

Trabalho de Conclusão de Curso

Bruno Vinnicius Souza de Oliveira

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE JARAGUÁ DO SUL

Florianópolis
2018



Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

Bruno Vinnicius Souza de Oliveira

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS:
ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE JARAGUÁ DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora da Universidade Federal de Santa Catarina para a conclusão do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano
Coorientadora: Eng. Msc. Carolina Bayer Gomes Cabral

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Bruno Vinnicius Souza de
Avaliação da eficiência energética em estações de
tratamento de esgotos sanitários : Estudo de caso
no município de Jaraquá do Sul / Bruno Vinnicius
Souza de Oliveira ; orientador, Rodrigo de Almeida
Mohedano, coorientadora, Carolina Bayer Gomes
Cabral, 2018.
112 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2.
Engenharia Sanitária e Ambiental. 3. Eficiência
energética. 4. Tratamento de esgotos. 5.
Saneamento. I. Mohedano, Rodrigo de Almeida. II.
Cabral, Carolina Bayer Gomes. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Bruno Vinnicius Souza de Oliveira

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS: ESTUDO DE
CASO NO MUNICÍPIO DE JARAGUÁ DO SUL-SC**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 25 de junho de 2018.



Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano
Orientador



Eng. Msc. Carolina Bayer Gomes Cabral
Coorientadora

Banca Examinadora:



Eng. Sebastian Rosenfeldt



Prof. Dr. Robertly Andrés Villazón Montalván
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Os estudos e iniciativas para avaliação e melhoria da eficiência energética na distribuição de água já estão bem estabelecidos e difundidos pelo Brasil, ao contrário do que se vê no setor de esgotamento sanitário. Mesmo a energia elétrica sendo, na maioria das vezes, a segunda maior despesa das Estações de Tratamento de Esgotos, pouco se vê sobre o assunto em referências nacionais, levando a uma necessidade de aprofundamento dos estudos sobre o tema, já que há um grande potencial de economia energética e financeira para as estações. Dessa forma, o presente trabalho visa avaliar a eficiência energética de quatro ETEs operadas pela SAMAE de Jaraguá do Sul (SC). As estações em estudo tratam esgotos domésticos provindos de diferentes bairros da cidade, tendo diferentes arranjos tecnológicos para diferentes populações, podendo atender de 8.000 a 70.000 habitantes equivalentes. A avaliação energética das ETEs se deu através da comparação com outras encontradas na literatura, tendo os dados necessários fornecidos diretamente pela companhia de saneamento. Com relação estações as nacionais, as da SAMAE JS apresentaram resultados satisfatórios quanto à eficiência energética, entretanto, a quantidade de estações para se comparar é relativamente pequena. Já em relação às ETEs internacionais, foi possível observar que apesar das estações da SAMAE JS terem, relativamente, bons resultados, as eficiências de remoção dos poluentes estão muito aquém das estações internacionais comparadas. Os indicadores de desempenho energético das ETEs encontrados em literatura corroboram com as comparações feitas com as estações internacionais.

Palavras-chave: Eficiência energética. Tratamento de esgotos. Saneamento.

ABSTRACT

The studies and initiatives to assessment and improvement the energy efficiency in water supply distribution is already well established and widespread in Brazil, unlike what has been seen in wastewater sector. Even the electrical energy being, most of the time, the second largest expenditure of a Wastewater Treatment Plant, little can be seen on the subject in national references, leading to a need of further researches about the topic since there is a great potential for energy and economic savings in a treatment plant. Thus, the present work aims to evaluate the energy efficiency of four WWTPs operated by SAMAE of Jaraguá do Sul (SC). The studied plants treat domestic sewage coming from different neighborhood of the city, which one with different technological arrangements for different populations, with capacities from 8.000 to 70.000 population equivalent. The energy evaluation of WWTPs was done by benchmarking with the other plants found in literature, having the necessary data provided directly by the sanitation company. In relation to the national plants, the WWTPs of SAMAE JS presented satisfactory results regarding the energy efficiency, however, the amount of plants to be compare is relatively small. In respect to the international WTTPs, it was possible observe that despite the SAMAE JS have relatively good results, pollutant removal efficiencies are far short compared with international plants. Performance indicators of energy efficiency from WWTPs found in literature corroborate with the comparisons made with international plants.

Keywords: Energy efficiency. Sewage treatment. Sanitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método iterativo PDCA.....	43
Figura 2 - Comparação do ciclo de vida de uma bomba ineficiente com uma eficiente	46
Figura 3 - Mapa de localização	51
Figura 4 - Área de cobertura das ETEs	52
Figura 5 - Fluxograma da ETE Água Verde	53
Figura 6 - Fluxograma da ETE Figueira	55
Figura 7 - Fluxograma da ETE Nereu Ramos.....	57
Figura 8 - Fluxograma da ETE São Luís.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Metas para os serviços de esgotamento sanitário nas macrorregiões e no Brasil (%).....	24
Tabela 2 – Estimativas de custos de construção e de operação e manutenção em ETEs.....	29
Tabela 3 - Uso típico de energia em uma ETE.....	34
Tabela 4 - Indicadores de Desempenho para consumo de energia em ETEs	36
Tabela 5 - Comparação entre os IDs mais utilizados	38
Tabela 6 - Indicadores de consumo de energia por processos de tratamento	40
Tabela 7 - Indicadores selecionados para a realização da verificação energética	61
Tabela 8 - Valores característicos da verificação energética.....	62
Tabela 9 - Consumo de energia elétrica por estação (kWh).....	67
Tabela 10 – Despesa com energia elétrica por estação (R\$)	67
Tabela 11 - Estimativa do consumo energético mensal da aeração (kWh (%))	68
Tabela 12 - Dados para verificação energética das ETEs (04/2016 a 03/2017)	70
Tabela 13 - Valores característicos das ETEs da SAMAE JS	71
Tabela 14 - Resumo do desempenho dos indicadores com relação aos dados do ENERWATER	81
Tabela 15 – Valores característicos para benchmarking internacional .	82
Tabela 16 - Indicadores de consumo específicos para a aeração das ETEs da SAMAE JS	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Panorama dos Planos Municipais de Saneamento Básico ..	23
Gráfico 2 - Índice de coleta de esgotos (E1) e índice de tratamento dos esgotos coletados (E4).....	25
Gráfico 3 - Principais processos adotados no Brasil por número de estações	28
Gráfico 4 - Principais processos adotados no Brasil por população atendida	28
Gráfico 5 - Média dos custos operacionais em companhias de saneamento entre os ano de 2010 e 2016.....	32
Gráfico 6 - Custos operacionais da ETE Barueri	32
Gráfico 7 - Custos operacionais da ETE Insular em Florianópolis	32
Gráfico 8 - Custos do ciclo de vida de um compressor.....	45
Gráfico 9 - Quantidade de ETES nacionais por classes de tamanho.....	64
Gráfico 10 - Quantidade de ETES internacionais por classes de tamanho	65
Gráfico 11 - Consumo de energia elétrica em cada ETE	70
Gráfico 12 - Benchmarking com ETES Nacionais até 600 mil habitantes	73
Gráfico 13 - Benchmarking com ETES Nacionais até 100 mil habitantes	74
Gráfico 14 - Benchmarking com ETES Nacionais com Tratamento Anaeróbio + Lodos Ativados	75
Gráfico 15 - Benchmarking com ETES Nacionais com relação à energia consumida na aeração.....	76
Gráfico 16 - Benchmarking com ETES Internacionais (e_{EPT})	77
Gráfico 17 - Benchmarking com ETES Internacionais ($e_{EPT} \times Q_d$).....	77
Gráfico 18 - Benchmarking com ETES Internacionais (e_v).....	78
Gráfico 19 - Benchmarking com ETES Internacionais (e_{DQO})	79
Gráfico 20 - Benchmarking com ETES Internacionais (e_{DBO5})	79
Gráfico 21 - Benchmarking com ETES Internacionais (efic. remoção de DQO).....	80
Gráfico 22 - Benchmarking com ETES Internacionais (efic. remoção de DBO_5).....	81
Gráfico 23 - Boxplot com valores estatísticos de e_v e valores característicos encontrados para as ETES da SAMAE JS	83
Gráfico 24 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} e valores característicos encontrados para as ETES da SAMAE JS	84
Gráfico 25 - Boxplot com valores estatísticos de remoção de DQO e as eficiências encontrados para as ETES da SAMAE JS	85

Gráfico 26 - Boxplot com valores estatísticos de remoção de DBO_5 e as eficiências encontrados para as ETEs da SAMAE JS	86
Gráfico 27 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS (ETEs Nacionais e Internacionais).....	87
Gráfico 28 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} para ETEs Nacionais e Internacionais separadamente.....	88
Gráfico 29 - Benchmarking global (e_{EPT})	89
Gráfico 30 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS, apenas para ETEs com algum processo de Lodos Ativados (ETEs Nacionais e Internacionais).....	90
Gráfico 31 - Benchmarking global ETEs Lodos Ativados (e_{EPT})	91
Gráfico 32 - Indicadores encontrados na literatura (e_{EPT} [kWh/hab.ano])	92
Gráfico 33 - Indicadores encontrados na literatura (e_v [kWh/m ³]).....	93
Gráfico 34 - Indicadores encontrados na literatura (e_{DQO} [kWh/kg DQO_{rem}])	95
Gráfico 35 - Indicadores encontrados na literatura (e_{DBO_5} [kWh/kg $\text{DBO}_{5\text{rem}}$]).....	96
Gráfico 36 - Boxplot com valores estatísticos de e_{DQO} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS	113
Gráfico 37 - Boxplot com valores estatísticos de e_{DQO} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS.....	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	–	Agência Nacional de Águas
DBO	–	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	–	Demanda Química de Oxigênio
ETE	–	Estação de Tratamento de Esgotos
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	–	Indicador de Desempenho
kWh	–	Kilowatt hora
LA	–	Lodos Ativados
LAC	–	Lodos Ativados Convencionais
NBR	–	Norma Brasileira Regulamentadora
OD	–	Oxigênio Dissolvido
PLANSAB	–	Plano Nacional de Saneamento Básico
RALF	–	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado
SAMAE	–	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SAMAE JS	–	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Jaraguá do Sul
SBR	–	Sequencing Batch Reactor
SNIS	–	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNSA	–	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
SST	–	Sólidos Suspensos Totais
TWh	–	Terawatt hora
UASB	–	Upflow Anaerobic Sludge Blanket

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. OBJETIVO GERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1. SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL.....	21
3.1.1. Bases legais	21
3.1.2. Metas do Plansab	23
3.2. TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS.....	26
3.2.1. Processos de tratamento de esgotos.....	26
3.2.2. Custos operacionais em ETEs	29
3.3. ENERGIA E TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	33
3.3.1. Uso de energia no tratamento de esgotos.....	33
3.3.2. Indicadores de Desempenho e Benchmarking.....	35
3.3.3. Eficiência energética e potenciais fontes de economia ...	39
3.3.3.1. Planejamento, implementação e operação.....	40
3.3.3.2. Gestão de energia	42
3.3.3.3. Sistema de aeração	44
3.3.3.4. Motobombas e misturadores.....	46
3.3.3.5. Tratamento do lodo e aproveitamento de biogás.....	47
3.3.3.6. Recomendações gerais e exemplos de eficiência energética	49
4. METODOLOGIA	51
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS ETEs E DA ÁREA DE ESTUDO	51
4.1.1. ETE Água Verde.....	52
4.1.2. ETE Ilha da Figueira.....	55
4.1.3. ETE Nereu Ramos	57
4.1.4. ETE São Luís	58
4.2. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DAS ETEs ESTUDADAS	60
4.3. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS ETEs ESTUDADAS.	61
4.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA.....	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67

5.1.	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	67
5.2.	VALORES CARACTERÍSTICOS.....	70
5.3.	COMPARAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO	
	72	
5.3.1.	<i>Benchmarking Nacional</i>	72
5.3.2.	<i>Benchmarking Internacional</i>	76
5.3.3.	<i>Benchmarking Global</i>	87
5.4.	INDICADORES ENCONTRADOS NA LITERATURA	91
5.4.1.	<i>Consumo específico por habitante equivalente (e_{EPT})</i>	91
5.4.2.	<i>Consumo específico por volume tratado (e_v)</i>	93
5.4.3.	<i>Consumo específico por kg de DQO removida (e_{DQO})</i>	94
5.4.4.	<i>Consumo específico por kg de DBO₅ removida (e_{DBO5})</i> ..	95
5.4.5.	<i>Consumo específico da aeração ($e_{aer, PE}$; $e_{aer, v}$; $e_{aer, DQO}$)</i> ..	96
6.	CONCLUSÕES.....	99
7.	RECOMENDAÇÕES.....	103
	REFERÊNCIAS.....	105
	ANEXO A – BOXPLOT DOS INDICADORES DE DESEMPENHO	
	E_{DQO} E E_{DBO5} PARA A BASE DE DADOS DO ENERWATER	
	(2016).....	113

1. INTRODUÇÃO

A qualidade dos corpos hídricos está diretamente ligada ao tratamento que se dá aos efluentes gerados naquela bacia, e em certos casos podendo até mesmo transpô-las. Quanto menor é o índice de tratamento de esgotos de determinado local, mais caro será para tratar a água para consumo e mais doenças relacionadas a veiculação hídrica ocorrerão na região. Segundo relatório da ONU (2014), a cada 1 dólar investido em água e saneamento, são economizados 4,3 dólares em saúde.

Com relação ao saneamento, o índice de tratamento de esgotos no Brasil ainda está em níveis de países subdesenvolvidos, atingindo uma média nacional de aproximadamente 43% (ANA; SNSA, 2017). Em Santa Catarina a situação é ainda pior, sendo que o índice de esgoto tratado é de 24%, o menor da região Sul e ficando à frente apenas de 10 estados brasileiros, principalmente no Norte e Nordeste (ANA; SNSA, 2017). Já os índices de coletas são de 61% para o país e 33% para o estado de SC, sendo novamente o pior índice do Sul do Brasil e estando a frente de outros 12 estados (ANA; SNSA, 2017). Dito isso, fica evidente o esforço necessário para se atingir a universalização do acesso ao saneamento.

De acordo com o Atlas de Esgotos (ANA; SNSA, 2017), o qual considera apenas a população urbana, o tratamento coletivo do esgoto coletado conta com 2.768 Estações de Tratamento de Esgotos, atendendo a uma população de cerca de 71,7 milhões de pessoas. O tratamento em si pode exigir significativas quantidades de energia para a realização do processo, dependendo da tecnologia adotada, das características do efluente e das exigências da legislação vigente. Processos que incluem fornecimento mecânico de ar para o tratamento são, de forma geral, substancialmente mais dispendiosos energeticamente que estações que se utilizam de processos anaeróbios ou ainda aeração natural, como é o caso de lagoas facultativas.

Sabe-se que o gasto energético com o setor de água no país é imensamente maior que com o setor de esgotamento sanitário. Para efeito de comparação, o SNIS (2016) apresenta um consumo energético anual no setor de água de 10,69 TWh enquanto que para o setor de esgotos o consumo anual é de cerca de 1,24 TWh, quase 12% em relação a água. Contudo, sabe-se que os índices de cobertura de abastecimento de água são consideravelmente maiores que os índices de esgoto, levando a crer que o tratamento de efluentes poderá representar uma parcela significativa quando se atingirem as metas de universalização estabelecidas no Plansab (2013). Ainda de acordo com o SNIS (2016), foram gastos em energia

elétrica no setor de saneamento no Brasil cerca de 5,4 bilhões de reais naquele ano. Nesse contexto, a melhoria da eficiência energética dos sistemas de esgotamento sanitário é fundamental.

A eficiência energética pode ser considerada como o menor consumo energético possível para a realização de determinada tarefa, nesse caso a coleta, o transporte e o tratamento dos esgotos. Apesar de o abastecimento de água ser significativamente mais intensivo no uso de energia, os trabalhos nessa área já estão bem estabelecidos e conhecidos no Brasil, o que não ocorre no tratamento de esgotos. Raras são as ETEs que desenvolvem projetos nessa área no país, tornando-se assim uma enorme área para trabalhos futuros e abrigando grandes potenciais de economias energéticas e financeiras.

Nota-se a inexistência de normas brasileiras para avaliação do consumo energético das estações de tratamento de esgotos. Entretanto, alguns países como a Alemanha e a Suíça, por exemplo, já possuem metodologias padronizadas para tal, tornando o processo de avaliação mais simples e confiável. A título de exemplo, a norma alemã DWA-A 216 utiliza-se de indicadores de desempenho, ou valores característicos, como são chamados pela norma, para avaliar o consumo energético. Esses valores são usados de forma comparativa, entre estações similares, para se obter um quadro do consumo energético de cada ETE.

Neste contexto, será avaliada neste estudo, a eficiência energética de ETEs com base em estudos de caso feitos em quatro estações de tratamento de esgotos localizadas na cidade de Jaraguá do Sul (SC). Para isso, serão utilizados indicadores de desempenho disponíveis na literatura, a fim de se ter uma base comparativa para avaliar as estações em questão.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência energética de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) tendo como base os arranjos tecnológicos disponíveis em ETEs no município de Jaraguá do Sul - SC.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Avaliar a eficiência de remoção da matéria orgânica dos diferentes processos de tratamento utilizados nas Estações de Tratamento de Esgotos estudadas.
- b. Levantar o consumo total e específico de energia elétrica das estações de tratamento de esgotos.
- c. Comparar os indicadores de eficiência energética avaliados nas ETEs estudadas, com dados obtidos em literatura para realização do processo de benchmarking entre as estações.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL

3.1.1. Bases legais

O saneamento no Brasil está pautado na Constituição Federal, maior instância legislativa do país, e em diversas leis nacionais, estaduais e municipais. De acordo com a Constituição, em seu artigo 21, inciso XX, é competência da União “instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, saneamento básico e transportes urbanos”. O artigo 23 (inciso IX) por sua vez, imputa à União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios a competência para promover melhorias nas condições de saneamento básico. A Constituição estabelece ainda aos Municípios “organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local”, sendo entendido os serviços de saneamento básico como de interesse local.

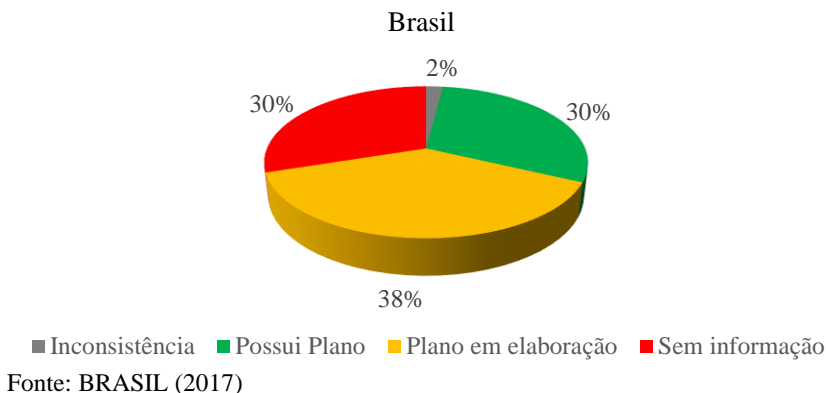
A lei que instituiu o Sistema Único de Saúde (SUS), nº 8.080 de 1990, em seu artigo 3º estabelece o saneamento básico como um dos fatores determinantes e condicionantes para a saúde. Determina também como campo de atuação do SUS a execução de ações de saneamento básico, assim como compete à União, ao Estado e aos Municípios a mesma função. Ainda na década de 90, surgiu a lei 9.433/1997 que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos, tendo, entre outros, o objetivo de garantir a disponibilidade hídrica para as futuras gerações. Já a garantia do direito ao saneamento foi estabelecida através da lei 10.257 de 2001, em seu artigo 2º, assim como instituiu o tratamento prioritário às obras de saneamento.

Mais recentemente, em 2007, foi criada a Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico (lei nº 11.445/2007), a qual tem como princípio fundamental, dentre outros, a universalização do acesso aos serviços públicos de saneamento básico, os quais se entendem como o “conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de” abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo das águas pluviais e limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas. A lei determina também, através do artigo 52, que “a União elaborará, sob a coordenação do Ministério das Cidades” o Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), o qual conterá:

- a) *os objetivos e metas nacionais e regionalizadas, de curto, médio e longo prazos, para a universalização dos serviços de saneamento básico e o alcance de níveis crescentes de saneamento básico no território nacional, observando a compatibilidade com os demais planos e políticas públicas da União;*
- b) *as diretrizes e orientações para o equacionamento dos condicionantes de natureza político-institucional, legal e jurídica, econômico-financeira, administrativa, cultural e tecnológica com impacto na consecução das metas e objetivos estabelecidos;*
- c) *a proposição de programas, projetos e ações necessários para atingir os objetivos e as metas da Política Federal de Saneamento Básico, com identificação das respectivas fontes de financiamento;*
- d) *as diretrizes para o planejamento das ações de saneamento básico em áreas de especial interesse turístico;*
- e) *os procedimentos para a avaliação sistemática da eficiência e eficácia das ações executadas*

Outro ponto importante na lei 11.445/2007 foi a imposição da elaboração do plano de saneamento básico pelo titular dos serviços de saneamento. Para reforçar a importância da elaboração do plano, foi definido por meio do Decreto 7.217/2010 que os municípios que quiserem pleitear recursos da União para serviços de saneamento, deverão ter o Plano Municipal de Saneamento Básico elaborados a partir do exercício financeiro de 2014. Em virtude da escassez de planos municipais, o Decreto 8.211/2014 alterou a data limite para 31 de dezembro de 2015, entretanto a existência dos planos ainda era rara nos municípios. Com isso, alterou-se a data novamente, através do Decreto 8.629/2015, para o dia 31 de dezembro de 2017. Ainda sem grandes avanços, a data foi prorrogada mais uma vez para 31 de dezembro de 2019. A situação atual dos municípios brasileiros em relação aos Planos Municipais de Saneamento Básico pode ser observada no Gráfico 1 abaixo.

Gráfico 1 - Panorama dos Planos Municipais de Saneamento Básico



Atualmente o número de municípios com Plano Municipal de Saneamento Básico é de 1.692, correspondendo a 30% dos municípios brasileiros, já os municípios com plano em elaboração chegam a 2.091, o que representa 38% dos municípios do país, totalizando os municípios com planos elaborados e em elaboração em 3.783 (68%), segundo o Panorama dos Planos Municipais de Saneamento Básico no Brasil (BRASIL, 2017). Outros 30% dos municípios não possuem informações e os 2% restante apresentam inconsistência.

3.1.2. Metas do Plansab

A lei nº 11.445/2007 determina através de seu artigo 52 que seja elaborado, sob a coordenação do Ministério das Cidades, o Plansab. Exige ainda que nele deva conter, entre outras coisas, as metas nacionais e regionais de curto, médio e longo prazo para a universalização dos serviços de saneamento básico e o alcance de níveis crescentes de saneamento básico no território nacional. Dessa forma, na elaboração do Plansab (BRASIL, 2013) foram determinadas metas para os períodos de 5, 10 e 20 anos, resultando em cenários para os anos de 2018, 2023 e 2033 (curto, médio e longo prazo, respectivamente).

A partir dos sistemas de informação disponíveis, foi elaborado um quadro contemplando 23 indicadores abrangendo as quatro áreas do saneamento e os aspectos de gestão. Para o abastecimento de água foram criados indicadores de A1 a A7, para esgotamento sanitário de E1 a E6, resíduos sólidos de R1 a R5, para drenagem e manejo das águas pluviais urbanas apenas D1 e para aspectos de gestão dos serviços, G1 a G4. Em

cima desses indicadores foram estipuladas metas progressivas de expansão e qualidade dos serviços.

Diferente das metas estipuladas para os serviços de abastecimento de água e de coleta de resíduos domiciliares, no qual é prevista a universalização do atendimento dos serviços até 2033, as metas para o esgotamento sanitário não atingirão a totalidade da população no final desse período, ficando com um índice de domicílios urbanos e rurais servidos por rede coletora ou fossa séptica em 92%. Para o tratamento dos esgotos coletados, definiu-se como meta de longo prazo o índice de 93%, resultando num índice de tratamento de esgotos gerados de 86%. A Tabela 1, abaixo, apresenta as metas do Plansab (BRASIL, 2013) para os indicadores de E1 a E4 na área de esgotamento sanitário, divididos em macrorregiões e a média brasileira.

Tabela 1 - Metas para os serviços de esgotamento sanitário nas macrorregiões e no Brasil (%)

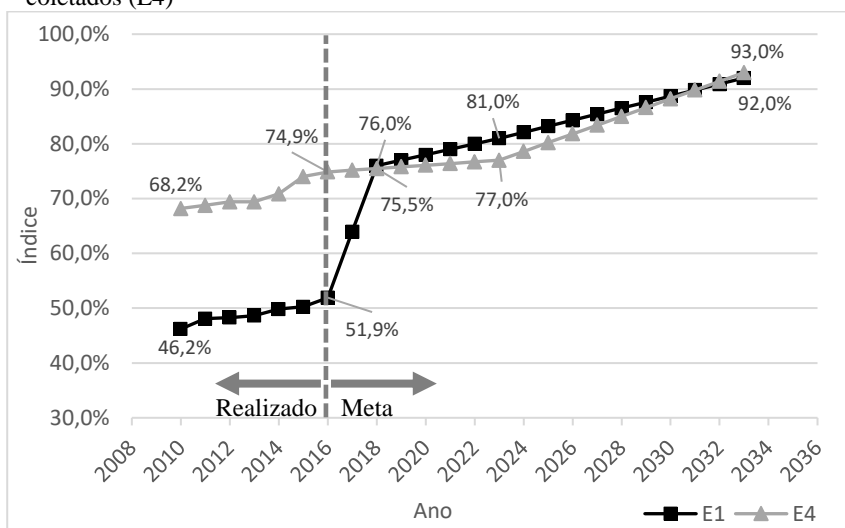
Indicador	Ano	Brasil	N	NE	SE	S	CO
E1. % de domicílios urbanos e rurais servidos por rede coletora ou fossa séptica para as excretas ou esgotos sanitários	2010	67	33	45	87	72	52
	2018	76	52	59	90	81	63
	2023	81	63	68	92	87	70
	2033	92	87	85	96	99	84
E2. % de domicílios urbanos servidos por rede coletora ou fossa séptica para as excretas ou esgotos sanitários	2010	75	41	57	91	78	56
	2018	82	56	66	94	84	69
	2023	85	68	73	95	88	77
	2033	93	89	86	98	96	92
E3. % de domicílios rurais servidos por rede coletora ou fossa séptica para as excretas ou esgotos sanitários	2010	17	8	11	27	31	13
	2018	35	24	28	49	46	40
	2023	46	34	39	64	55	53
	2033	69	55	61	93	75	74
E4. % de tratamento de esgoto coletado	2010	53	62	66	46	59	90
	2018	69	75	77	63	73	92
	2023	77	81	82	72	80	93
	2033	93	94	93	90	94	96

Fonte: Adaptado de BRASIL (2013)

Legenda: N – Norte; NE – Nordeste; SE – Sudeste; S – Sul; CO – Centro Oeste.

A partir dos índices E1 e E4 traçados como meta no Plansab (BRASIL, 2013), apresentados na Tabela 1, e dos dados obtidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS), elaborou-se o Gráfico 2 a seguir, no qual é possível observar a evolução dos serviços de esgotamento sanitário no país a partir de 2010 e a evolução sugerida na elaboração do Plano Nacional. Para os indicadores E1 e E4 no ano de 2010, serão usados os dados do SNIS (2012) referente ao ano de 2010 para manter a conformidade das informações, uma vez que os dados do Plansab (BRASIL, 2013) são do Censo 2010.

Gráfico 2 - Índice de coleta de esgotos (E1) e índice de tratamento dos esgotos coletados (E4)



Fonte: Plano Nacional de Saneamento Básico e SNIS

De acordo com o SNIS (2018) referente a 2016, podemos constatar que a meta do indicador E4 para 2018 já foi alcançada e ultrapassada, uma vez que o objetivo era de alcançar 69% de tratamento dos esgotos coletados e já foi alcançado 74,9% nesse índice, ficando apenas 2,1% abaixo da meta para 2023. Já o índice E1, que se refere a coleta dos esgotos gerados, está 24,1% abaixo da meta para 2018, ficando atualmente (SNIS, 2018) em torno de 51,9%. É possível observar também através do gráfico que para atingir a meta de longo prazo (2033) do Plansab (BRASIL, 2013), para o indicador E1, serão necessários grandes investimentos e um crescimento do índice maior que o observado nos últimos anos, a fim de se atingir os 92%. Já o índice E4, apesar de estar acima da meta para o curto

prazo (2018), também serão necessários grandes esforços para se atingir os 93% estipulados para 2033.

É muito importante, portanto, que esses investimentos para universalização dos serviços de esgotamento sejam feitos sem aumentar excessivamente as tarifas de esgoto. Como os gastos com energia, geralmente, são o segundo maior de uma companhia de saneamento, é fundamental que se tenha uma boa eficiência energética para se manter os preços das tarifas acessíveis.

3.2. TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS

3.2.1. Processos de tratamento de esgotos

Jordão e Pessoa (1995) classificam os processos de tratamento basicamente em físicos, químicos ou biológicos, sendo definidos em função do fenômeno predominante. Os processos físicos, segundo Jordão e Pessoa (1995), são aqueles que visam principalmente a remoção de substâncias em suspensão no esgoto, separando-as fisicamente; já os processos químicos são caracterizados pelo uso de produtos químicos, sendo adotados normalmente em conjunto com outro tipo de processo; e por fim, os processos biológicos são aqueles que se utilizam da ação dos microrganismos presentes no próprio esgoto, transformando componentes complexos em compostos simples. Além desses, existem diversos outros processos em estudo e de implantação mais recentes que se constituem no chamado “tratamento avançado”. Exemplos dele são: adsorção por carvão, troca de íons, filtração por membranas, osmose inversa, entre outros (JORDÃO; PESSOA, 1995).

De acordo com Sperling (2005), os processos são separados também conforme seu nível de tratamento, dividindo-se em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar tem por objetivo a remoção apenas dos sólidos grosseiros e de areia, enquanto o tratamento primário tem a finalidade de remoção dos sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica (SPERLING, 2005). No tratamento secundário o objetivo, geralmente, é remover a matéria orgânica, contudo a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo também é possível, e, por último, o tratamento terciário tem o propósito de remover poluentes específicos ou os poluentes que não foram removidos pelo tratamento secundário (SPERLING, 2005).

Tais processos de tratamento se dão em uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), que segundo a NBR 12.209 (ABNT, 2011), se define como:

Conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras de esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento.

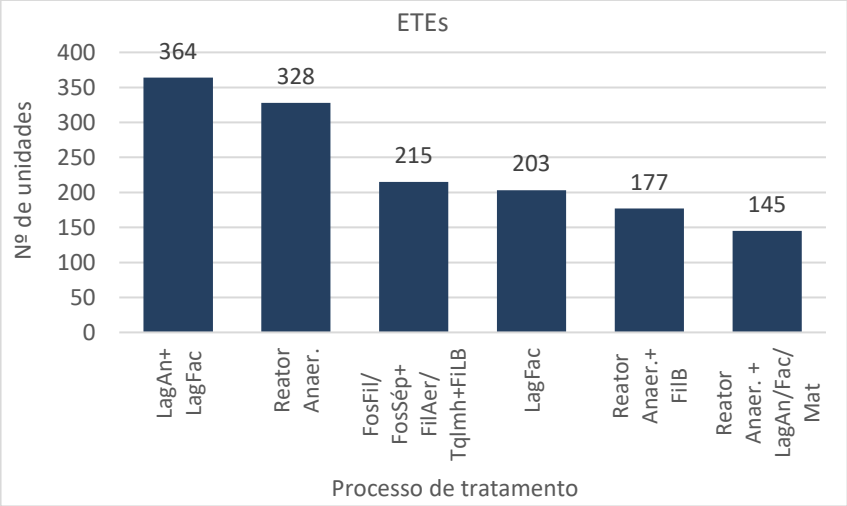
Esse conjunto de unidades pode ser concebido de diversas formas e por diversas tecnologias diferentes, dependendo de vários fatores, como questões legais, aspectos econômicos, operacionais, de disponibilidade de área e outros.

O Atlas Esgotos (ANA; SNSA, 2017) apontou no Brasil 2.768 ETEs em operação, atendendo a uma população de aproximadamente 72 milhões de pessoas e identificando 38 principais processos de tratamento no país. Os mais utilizados para tratamento de efluentes domésticos são os Sistemas Australianos, compostos por Lagoa Anaeróbia seguida por Lagoas Facultativas, e os Reatores Anaeróbios, com 364 e 328 unidades, respectivamente. As outras estações mais encontradas são: processos de Fossa Filtro/Fossa Séptica + Filtro Aeróbio/Tanque Imhoff + Filtro Biológico com 215 unidades; Lagoa Facultativa com 203 unidades; Reator Anaeróbio + Filtro Biológico com 177 e, por fim, 145 estações concebidas por Reator Anaeróbio + Lagoa Anaeróbia/Facultativa/Maturação. Com isso, temos que 52% das estações identificadas utilizam basicamente 6 processos diferentes. Observa-se ainda que aproximadamente 764 estações utilizam algum tipo de processo aerado, o que representa 28% das ETEs. O Gráfico 3 mostra os principais processos de tratamento adotados no país.

Com relação a quantidade de habitantes servidos, o principal processo que atende a maior parte da população é o processo por Lodos Ativados Convencional, com um total de 16,5 milhões de habitantes, ou aproximadamente 23% das 71,7 milhões de pessoas atendidas por tratamento coletivo, de acordo com os dados da ANA (2017). Os demais processos, que somados a esse atendem cerca de 54% da população (38,8 milhões de pessoas), são ETEs com tratamento Primário, atendendo 7,9 milhões de habitantes; Lagoa Anaeróbio + Lagoa Facultativa que atende 5,5 milhões de pessoas; Reator Anaeróbio + Filtro Aerado + Decantador com 4,5 milhões e, por último, o processo de Lodos Ativados com Aeração Prolongada, atendendo a uma população de 4,4 milhões de pessoas. Considerando somente os processos que exigem aeração em alguma parte do tratamento, tem-se o equivalente a 55% da população atendida com sistemas de tratamentos coletivos, o que representa cerca de 39,2 milhões

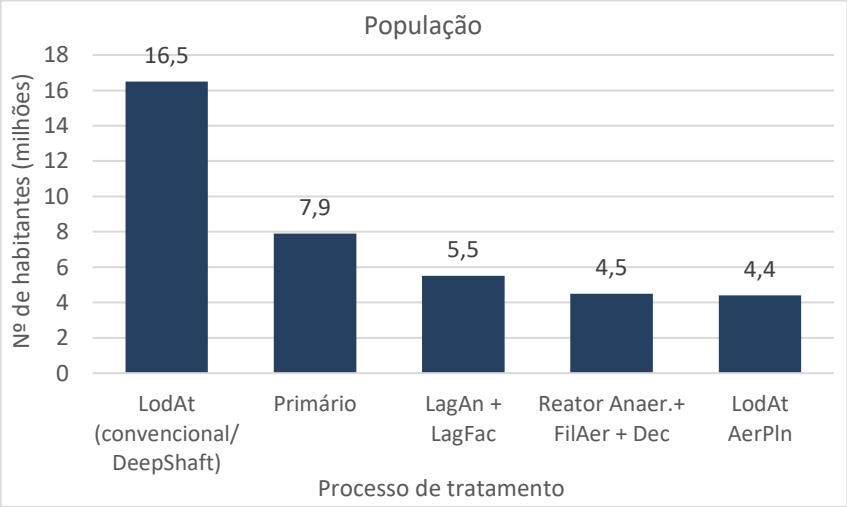
de habitantes. O Gráfico 4 apresenta os principais processos de tratamento relativos à população atendida

Gráfico 3 - Principais processos adotados no Brasil por número de estações



Fonte: Adaptado de (ANA; SNSA, 2017)

Gráfico 4 - Principais processos adotados no Brasil por população atendida



Fonte: Adaptado de (ANA; SNSA, 2017)

De forma geral, a maior parte das ETEs remove entre 60% a 80% da DBO₅ dos efluentes, sendo que apenas 9% delas tem eficiências inferiores a 60% (ANA; SNSA, 2017). Já com relação à população atendida, o tratamento direcionado a 53% das pessoas, o que representa 37,7 milhões de habitantes, tem uma eficiência de remoção de DBO₅ maior que 80% (ANA; SNSA, 2017). Tratamento com remoções inferiores a 60% se restringe a 12% da população atendida por tratamentos coletivos (ANA; SNSA, 2017).

3.2.2. Custos operacionais em ETEs

Os custos para o tratamento de esgotos dividem-se basicamente em dois, os de implantação e os de operação. Os custos de implantação se referem, como o nome sugere, aos custos para construção da ETE, levando em conta questões como terreno, mão de obra, terraplanagem, materiais para obra, etc. Já os custos operacionais, segundo Wendland e Ozoguz (2013), estão relacionados aos custos com pessoal, energia, manutenção, produtos químicos e materiais, disposição final e outros. Na Tabela 2 abaixo, são apresentados os valores referentes a implantação e operação de alguns tipos de sistemas de tratamentos de esgotos. Visto que os custos obtidos na literatura são referentes a 2004, sentiu-se a necessidade de atualizá-los para o ano corrente.

Tabela 2 – Estimativas de custos de construção e de operação e manutenção em ETEs

Sistema	Valores referentes a 2004		Valores atualizados (2018)	
	Construção (R\$/hab.)	Operação e Manutenção (R\$/hab.ano)	Construção (R\$/hab.) ¹	Operação e Manutenção (R\$/hab.ano) ²
Tq. Séptico	30,0 – 50,0	1,5 – 2,5	78,0 – 130,0	3,0 – 5,0
Lagoa Facult.	40,0 – 80,0	2,0 – 4,0	104,0 – 208,00	4,0 – 8,0
Lagoa Anaer. + Lagoa Fac.	30,0 – 75,0	2,0 – 4,0	78,0 – 195,0	4,0 – 8,0
Lag. Aerada + Lagoa Sed.	50,0 – 90,0	5,0 – 9,0	130,0 – 235,0	10,0 – 18,0
Lagoa Anaer. + Lagoa Fac. + Lag. Matur.	50,0 – 100,0	2,5 – 5,0	130,0 – 261,0	5,0 – 10,0
Wetlands	50,0 – 80,0	2,5 – 4,0	130,0 – 208,0	5,0 – 8,0
UASB	30,0 – 50,0	2,5 – 3,5	78,0 – 130,0	5,0 – 7,0
UASB + Lodos Ativ.	70,0 – 110,0	7,0 – 12,0	182,0 – 287,0	14,0 – 24,5

Sistema	Valores referentes a 2004		Valores atualizados (2018)	
	Construção (R\$/hab.)	Operação e Manutenção (R\$/hab.ano)	Construção (R\$/hab.) ¹	Operação e Manutenção (R\$/hab.ano) ²
UASB + Filtro Biol. de Alta Taxa	60,0 – 90,0	5,0 – 7,5	156,0 – 235,0	10,0 – 15,0
UASB + Lag. Aerada Fac.	40,0 – 90,0	5,0 – 9,0	104,0 – 235,0	10,0 – 18,0
LAC	100,0 – 160,0	10,0 – 20,0	261,0 – 417,0	20,5 – 40,5
Lodos Ativ. c/ Aeração Prol.	90,0 – 120,0	10,0 – 20,0	235,0 – 313,0	20,5 – 40,5
SBR	90,0 – 120,0	10,0 – 20,0	235,0 – 313,0	20,5 – 40,5
LAC com Re- moção Biol. de N	110,0 – 170,0	10,0 – 22,0	287,0 – 443,0	20,5 – 44,5
LAC com Re- moção Biol. de N/P	130,0 – 190,0	15,0 – 25,0	339,0 – 495,0	30,5 – 50,5
Desinfecção ³	5,0 – 10,0	0,5 – 1,5	13,0 – 26,0	1,0 – 3,5

Fonte: Adaptado de (SPERLING, 2005)

Legenda:

¹ Valor atualizado através do INCC-DI (Índice Nacional de Custo da Construção – Disponibilidade Interna) entre o período de 01/01/2004 até 01/01/2018;

² Valor atualizado através do IPCA (Índice de Preços ao Consumidor) entre o período de 01/01/2004 até 01/01/2018;

³ Em caso de desinfecção na ETE, acrescenta-se os respectivos custos.

A escolha do processo de tratamento e o tamanho da estação implicam em diferentes custos para a estação, tanto de implantação quanto de operação. De forma geral, os sistemas mais simples e com pouca tecnologia agregada, como wetlands e lagoas, requerem grandes áreas mas operam com baixo consumo de energia, já as estações com alta tecnologia agregada requerem pouco espaço mas operam com altos custos de energia elétrica (JONASSON, 2007; WENDLAND; OZOGUZ, 2013). De acordo com Jonasson (2007) e Wendland e Ozoguz (2013), os custos específicos de operação (i.e., R\$/habitante) são significativamente maiores em estações pequenas (< 50.000 habitantes equivalentes), atingindo uma economia de escala em grandes estações.

Os custos operacionais das estações de tratamento de esgotos raramente são abordados em literatura nacional, e como Sampaio e Gonçalves (1999) e Jordão e Pessoa (1995) afirmam, a comparação dos custos com as experiências internacionais geralmente não são válidas. Sendo assim,

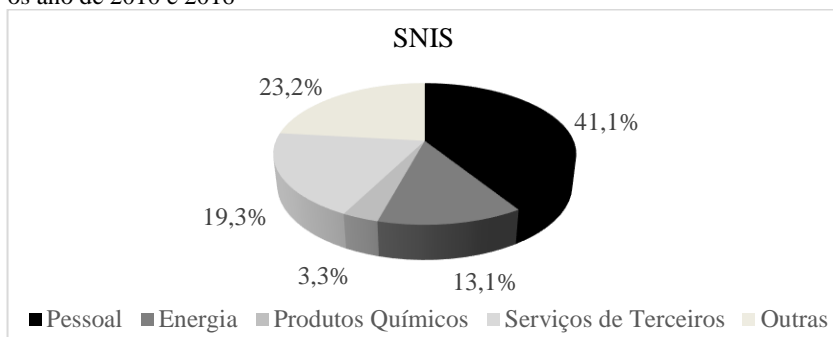
levantou-se as parcelas dos custos operacionais despendidos pelas companhias de saneamento (água e esgoto) através do SNIS e obteve-se uma média das porcentagens de cada custo entre os anos de 2010 e 2016. O resultado é apresentado através do Gráfico 5.

Para efeito de comparação, as parcelas dos custos da ETE Barueri (Barueri, SP), levantados por Sampaio e Gonçalves (1999), e da ETE Insular (Florianópolis, SC), levantados pelo TCE/SC (2004), são expostos no Gráfico 6 e Gráfico 7, respectivamente. Apesar dos dados do SNIS serem referentes às companhias de água e esgoto, apresentam certas semelhanças com os obtidos nas estações de tratamento de esgotos de Barueri e de Florianópolis.

A ETE Barueri opera através de um sistema de lodos ativados convencionais, sendo que os custos de energia representam 20% do total. A ETE Insular opera também através de lodos ativados, mas na modalidade de aeração prolongada, sendo a energia responsável por 32,5% dos custos totais da estação. Nota-se que o consumo da energia nas estações varia bastante. Nos casos apresentados, pode-se perceber que a energia elétrica é a segunda maior fonte de gastos das estações, representando uma parcela significativa das despesas.

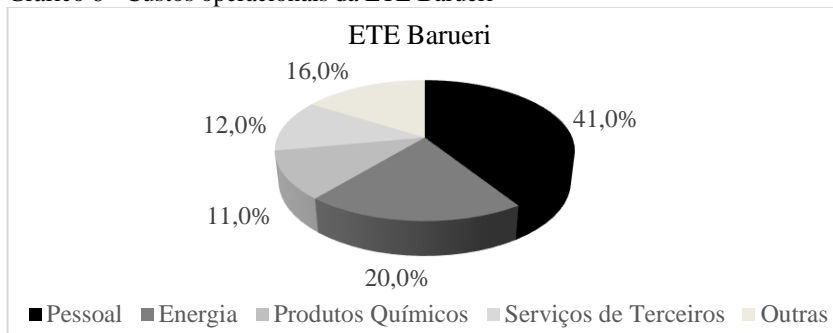
Nota-se através dos gráficos, que a maior parcela de gastos em uma ETE está relacionada com o pessoal e a energia elétrica, condizendo com a literatura encontrada (SILVA; ROSA, 2015). Esses somados representam cerca de 70,3% das despesas no caso da ETE Insular, 61% da ETE Barueri e 54,2% com relação aos dados do SNIS. A parcela de custos de energia elétrica nesses casos está dentro do que é encontrado em literatura internacional, uma vez que os mesmos apresentam uma variação significativa entre 2% e 60%, dependendo do tipo de processo e das características da estação (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015). Silva e Rosa (2015) relatam que os custos com energia podem variar entre 25% e 40% e representam a segunda maior despesa das estações.

Gráfico 5 - Média dos custos operacionais em companhias de saneamento entre os anos de 2010 e 2016



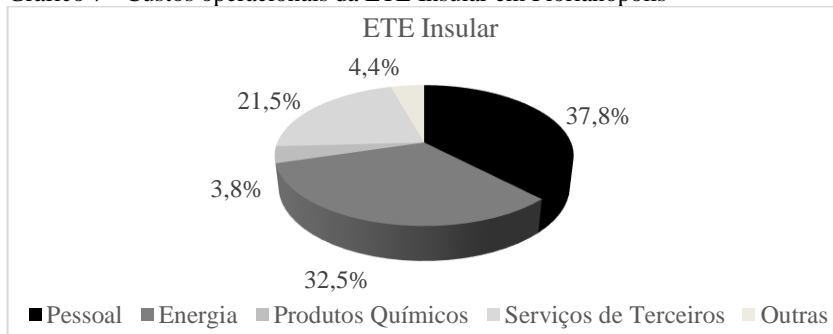
Fonte: Ministério das Cidades/SNIS

Gráfico 6 - Custos operacionais da ETE Barueri



Fonte: (SAMPAIO; GONÇALVES, 1999)

Gráfico 7 - Custos operacionais da ETE Insular em Florianópolis



Fonte: (TCE/SC, 2004)

3.3. ENERGIA E TRATAMENTO DE ESGOTOS

3.3.1. Uso de energia no tratamento de esgotos

O saneamento, de forma geral, é um setor onde se faz o uso intensivo de energia (LONGO et al., 2016). Em alguns países desenvolvidos, a energia despendida para o tratamento e abastecimento de água potável e na coleta e tratamento de esgotos sanitários, juntos, gira em torno de 2% a 4% do total da energia consumida no país (EPRI, 2013; EPA, 2013). Em algumas localidades essa parcela pode representar até 40% da energia utilizada (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015). Financeiramente, essa porção pode significar ao município cerca de 35% das despesas com energia (NYSERDA, 2008) ou 10% do orçamento anual dos governos locais (USEPA, 2013), se mostrando uma importante fonte de despesas. No Brasil, gasta-se por ano aproximadamente R\$5,5 bilhões com energia elétrica para o fornecimento de tais serviços (SNIS, 2016).

Para fornecimento de água tratada e tratamento de esgotos através de sistemas públicos, são gastos no Brasil, aproximadamente 2,6% do total da energia consumida, sendo 2,3% (10,69 TWh) empregados no setor de água e 0,3% (1,24 TWh) no de esgotos (BRASIL, 2016; EPE, 2016). Esse valor fica abaixo do relatado em pesquisas europeias, onde somente o tratamento de esgotos representa cerca de 1% da energia consumida nos países (LONGO et al., 2016; POST, 2007), e de referências norte americanas, onde apontam uma parcela de 0,8% da energia total (EPRI, 2013). Relata-se ainda experiências, como na Alemanha por exemplo, onde as estações de tratamento de esgotos são responsáveis pelo consumo de cerca de 20% da energia dos serviços municipais (FRICKE, 2009) e são ainda consideradas as maiores consumidoras de energia dos municípios (WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007). Tal disparidade entre as representatividades de energia gastas no tratamento de esgotos, evidencia a infraestrutura precária de saneamento no país, principalmente no setor de esgotos.

Enquanto o consumo de energia no abastecimento de água potável está relacionado, principalmente, com a distribuição da água, no tratamento de esgotos o principal consumidor é a ETE, sendo a coleta e transporte menos expressivos que o tratamento em si (EPRI, 2013). Há uma grande variedade de aspectos que influenciam no consumo total de energia da estação, sendo a escolha do processo o principal fator (JONASSON, 2007; SILVA; ROSA, 2015). O tamanho da estação também influencia no consumo energético, sendo que quanto maior a estação

maior o consumo, apesar de a energia ser usada de forma mais eficiente (JONASSON, 2007; SILVA; ROSA, 2015).

Além do tipo de processo e do tamanho da ETE, outros fatores também influenciam a demanda energética da estação. A topografia local, o layout da planta, as práticas de operação e manutenção, as características do esgoto afluente e do efluente final e a porcentagem com qual a ETE opera em relação a capacidade total são outros aspectos importantes (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015). Pode-se dizer também que a legislação local que regulamenta o lançamento do efluente tratado é um dos principais fatores que influenciam no consumo energético das estações.

Dentro da estação o consumo de energia é subdividido em função do tipo de tratamento e dos aspectos citados acima. Em processos de lodos ativados, tem-se o maior consumo de energia nos tanques de aeração, seguido pelo tratamento dos lodos (JORDÃO, 2008). São considerados os maiores consumidores de energia de uma estação os sopradores ou aeradores, conjuntos moto-bombas, válvulas e aquecedores (JONASSON, 2007). Na Tabela 3, são demonstrados os usos típicos da energia nos processos de tratamento por diversos autores, considerando diferentes arranjos tecnológicos.

Tabela 3 - Uso típico de energia em uma ETE

PROCESSO	REFERÊNCIA					
	1	2	3	4	5	6
Aeração	54,1%	52%	51,58%	-	46,41%	55,6%
Tratamento biol. + decant. secund.	-	-	-	67%	-	-
Processamento do lodo	18,2%	30%	8,78%	11%	19,13%	8,6%
Bombeamento	14,8%	15%	17,76%	5%	-	4,9%
Outros	9,8%	3%	21,88%	9%	10,45%	16,9%
Decantadores	3,2%	-	-	-	8,15%	14%
Floculação e filtração	-	-	-	8%	-	-
Reator anaeróbico	-	-	-	-	3,86%	-
Flotador	-	-	-	-	12,01%	-

Legenda:

¹ (FOCUS ON ENERGY, 2016)

² (EPRI, 2013)

³ (TAO; CHENGWEN, 2012)

⁴ (FRICKE, 2009)

⁵ (PASQUALINO et al., 2009)

⁶ (TAO; CHENGWEN, 2012)

Como pode ser visto, a aeração é a maior responsável pelo consumo de energia em ETEs, podendo variar entre 25% a 80% do consumo total da estação (JONASSON, 2007; LONGO et al., 2016; SILVA; ROSA, 2015). Em casos onde ocorre a remoção de nitrogênio, o consumo é ainda maior, uma vez que a energia requerida para o processo de oxidação é maior do que para oxidação da fração carbonácea, além também do sistema de recirculação necessário (JONASSON, 2007).

O tratamento de lodos, geralmente o segundo maior consumidor de energia das ETEs, pode variar bastante, dependendo do tipo de tratamento adotado. Processos aeróbios de tratamento de lodo consomem até duas vezes mais energia que os processos anaeróbios, sendo que estes ainda possibilitam a produção de energia através do biogás gerado (JONASSON, 2007). No processo de tratamentos do lodo, a energia é usada no bombeamento do lodo, no sistema de mistura, no deságue e adensamento e na oxidação através da injeção de ar no sistema, em caso de tratamento aeróbio (JONASSON, 2007).

3.3.2. Indicadores de Desempenho e Benchmarking

Para que se possa avaliar e controlar o consumo de energia nas ETEs, é necessário que se apresente, de forma resumida, as informações sobre o desempenho da estação (WENNERHOLM, 2014). Para isso, faz-se o uso dos Indicadores de Desempenho (IDs), definidos como uma relação entre variáveis onde o numerador indica o objetivo (i.e. algum consumo ou custo) e o denominador representa uma dimensão do sistema, podendo ser adimensional (e.g. %, -) ou intensivo (e.g. kWh/m³) (SILVA; ROSA, 2015; STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015; WENNERHOLM, 2014).

Os IDs são calculados para um determinado período de tempo, de preferência um ano, e devem ser facilmente entendíveis e claramente definidos, de modo a apresentar uma medida objetiva do sistema avaliado (JONASSON, 2007; MATOS et al., 2002; STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015). Eles podem expressar um desempenho geral do sistema ou de processos específicos (e.g. energia gasta com aeração, energia gasta com bombeamento, etc.) (FOCUS ON ENERGY, 2016).

Para o levantamento do consumo energético nas ETEs, podem ser usados diversos indicadores, dependendo dos objetivos e dos processos de tratamento adotados (LONGO et al., 2016). A

Tabela 4 apresenta alguns dos indicadores encontrados na literatura para tratamento de esgotos. Nota-se que além dos indicadores que expressam o consumo energético, também são encontrados indicadores para produção de energia e aproveitamento do biogás.

Tabela 4 - Indicadores de Desempenho para consumo de energia em ETEs

Descrição	Unidade
Consumo de energia por volume de esgoto tratado ^{1;2;3;4}	kWh/m ³
Consumo de energia por massa de DBO removida ^{1;2}	kWh/kg DBO ₅ removida
Consumo de energia por massa de DQO removida ^{1;2;3;4}	kWh/kg DQO removida
Consumo de energia por massa de SST removidos ¹	kWh/kg SST removido
Consumo de energia por massa de Nitrogênio removido ¹	kWh/kg N removido
Consumo de energia por massa de Fósforo removido ¹	kWh/kg P removido
Consumo de energia por população equivalente ^{1;2;3}	kWh/hab.
Produção de energia a partir do biogás por volume de esgoto tratado ²	kWh/m ³
Grau de independência energética da ETE a partir do aproveitamento do biogás – (kWh produzido / kWh total consumido) * 100 ²	%

Fontes:

¹ (LONGO et al., 2016)

³ (ENERWATER, 2015)

² (SILVA; ROSA, 2015)

⁴ (WENNERHOLM, 2014)

Os indicadores mais comuns de se encontrar na literatura são os que expressam o consumo de energia pelo volume de esgoto tratado, pela massa de DBO₅ removida e por unidade de população equivalente (i.e. kWh/m³, kWh/kg DBO₅removida e kWh/hab., respectivamente) (LONGO et al., 2016; WENNERHOLM, 2014; YANG et al., 2010). A unidade de população equivalente se refere a uma quantidade média de determinada substância (DBO, DQO, nitrogênio, etc.) que uma pessoa produz por dia, sendo diferente em cada país devido a questões culturais e tecnológicas (WENNERHOLM, 2014).

Em sua maioria, os indicadores são reportados em função do consumo total da estação (i.e. dados agregados) e apresentados como consumo elétrico total (kWh) ou relacionados ao volume de esgoto tratado (kWh/m³), sendo menos comum encontrar dados agregados de consumo de energia com relação às quantidades de DBO₅ e DQO eliminados ou de

população equivalente (LONGO et al., 2016). Dados do consumo energético em cada processo (i.e. dados desagregados) são considerados escassos na literatura, e geralmente são apresentados em kWh ou kWh/m³ (LONGO et al., 2016).

Por meio dos IDs levantados em uma estação, é possível compará-los com outras estações similares (processo de tratamento adotado, tamanho da estação, etc.) ou até mesmo com a própria estação ao longo do tempo, através do processo chamado de benchmarking (MATOS et al., 2002; WENNERHOLM, 2014). Tal processo é definido pela American Water Works Association (AWWA) como um padrão no qual outros possam medir ou avaliar algo (FOCUS ON ENERGY, 2016). Pode-se ainda considerar o benchmarking em energia como um processo contínuo e sistemático de comparação de eficiência energética com um desempenho de referência, identificando as unidades mais eficientes e as melhores práticas do setor (LONGO et al., 2016). Esse processo de monitoramento da própria unidade e também de comparação com outras similares é conhecido, mais especificamente, como benchmarking métrico (WENNERHOLM, 2014). As primeiras campanhas para realização desse procedimento em ETEs, iniciaram nos anos 90 nos países europeus e vem ganhando força desde então (JONASSON, 2007).

Devido as diferenças entre as ETEs, torna-se difícil o processo de comparação umas com as outras (WENNERHOLM, 2014). Mesmo que comparando estações similares, algumas podem ter, por exemplo, padrões de lançamento significativamente mais restritivos que outras, aumentando o consumo de energia de forma substancial (WENNERHOLM, 2014). Da mesma forma, comparações dos sistemas como um todo usando apenas um indicador pode ser muito simplista e levar a conclusões equivocadas, uma vez que, desse modo, assume-se que as estações são comparáveis com apenas uma métrica, quando na verdade se trata de um processo complexo, onde cada etapa tem um indicador que é mais apropriado (LONGO et al., 2016). A Tabela 5 mostra os IDs mais comuns e em quais etapas do tratamento são mais adequados.

Para que se tenha uma comparação apropriada, deve-se fazê-la entre estações similares em tamanho e/ou características e com os indicadores adequados à cada situação, levando-se em conta possíveis diferenças nas características do afluente da estação e dos padrões de lançamento da mesma (LONGO et al., 2016). O uso do ID kWh/m³, por exemplo, pode não representar o desempenho geral da planta, uma vez que o mesmo é afetado pela diluição do efluente (quanto mais diluído, maior o consumo de energia por metro cúbico), entretanto pode representar de forma apropriada o consumo nas etapas onde o processo de tratamento depende da

carga hidráulica, visto que a energia consumida depende do volume de efluente processado (LONGO et al., 2016). Por outro lado, nota-se que o consumo médio de energia por metro cúbico de esgoto tratado (i.e. kWh/m³), não varia significativamente entre os países, apesar das diferenças culturais e tecnológicas (HERNÁNDEZ-SANCHO; MOLINOS-SENANTE; SALA-GARRIDO, 2011).

Tabela 5 - Comparação entre os IDs mais utilizados

ID	Geral	Trat. Prelim.	Trat. Prim.	Trat. Secund.	Trat. Terc.	Trat. Lodo
kWh/m ³	x	✓✓	x	x	✓	x
kWh/hab.ano	x	x	x	x	x	x
kWh/kg DQO _{remov.}	✓	x	✓	✓	x	x
kWh/kg SST _{remov.}	x	x	✓✓	x	x	✓✓
kWh/kg N _{remov.}	✓	x	x	✓	x	x

Fonte: Adaptado de (LONGO et al., 2016)

Legenda:

✓✓ = sempre adequado

✓ = nem sempre adequado

x = inadequado

De acordo com o projeto ENERWATER (2015) e contrariando as recomendações apresentadas por Longo et al. (2016) na Tabela 5, os índices considerados mais apropriados para comparações, de forma geral, são kWh/hab.ano e kWh/kg DQO_{removida}, visto que eles representam a real função destinada às ETEs, a despoluição do efluente. Contudo, prefere-se geralmente o uso do ID kWh/m³ pela precisão e confiabilidade dos dados, uma vez que o volume tratado geralmente é medido de forma contínua, enquanto os outros parâmetros são aferidos de forma descontínua e com menor frequência, mascarando as variações diárias e sazonais intrínsecas ao sistema (SILVA; ROSA, 2015).

Por fim, o processo contínuo de benchmarking entre as estações vem levando a um declínio considerável no consumo de energia dos processos de tratamento (WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007). Comparando diferentes estações umas com as outras, com o intuito de melhoria contínua e redução do consumo energético, o benchmarking incentiva a competição entre as ETEs (JONASSON, 2007). Na Áustria, por exemplo, o benchmarking efetuado de forma contínua entre as estações reduziu cerca de 30% do consumo energético em apenas 5 anos (WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007). Outra vantagem associada ao benchmarking, é o fato de o operador da estação poder acompanhar o desempenho de novos sistemas ou equipamentos instalados, comparando com o histórico da própria

estação (FOCUS ON ENERGY, 2016; WENNERHOLM, 2014). Além disso, o processo proporciona uma valiosa troca de experiências entre as unidades (JONASSON, 2007).

3.3.3. Eficiência energética e potenciais fontes de economia

De modo geral, todas as estações de tratamento de esgotos possuem oportunidades para economia de energia (PANEPINTO et al., 2016). Contudo, as medidas para redução do consumo energético, não podem, de forma alguma, prejudicar a qualidade do efluente final, visto que a proteção da qualidade dos corpos hídricos é mais importante que uma possível redução no consumo de energia (ENERWATER, 2015).

O benchmarking, como demonstrado anteriormente, é uma ferramenta importante para aumentar a eficiência de uma ETE (JONASSON, 2007). Nos últimos anos, percebe-se que as agências de saneamento nos países desenvolvidos vêm demonstrando um crescente interesse em usar metodologias, como benchmarking e auditorias energéticas, para reduzir o consumo de energia (LONGO et al., 2016). Para se atingir uma máxima eficiência energética, entretanto, recomenda-se realizar uma avaliação do desempenho energético anualmente, para que se possa identificar e priorizar as oportunidades de aprimorar o uso da energia (FOCUS ON ENERGY, 2016; YANG et al., 2010).

Via de regra, os motores e acionamentos, as bombas, os sistemas de aeração e o tratamento do lodo, apresentam as melhores oportunidades de economia energética, visto que normalmente correspondem a mais de 90% da energia total usada no processo (NYSERDA, 2008). As fontes para economia de energia se enquadram em basicamente três categorias: 1) aprimoramento dos equipamentos; 2) modificações operacionais e 3) modificações nas edificações das ETEs (USEPA, 2013). Outro fator importante para redução do uso de energia é o uso de sensores para medição dos parâmetros em tempo real, evitando assim o uso excessivo de energia (HENRIQUES; CATARINO, 2017).

Uma regra geral bem aceita no ramo da eficiência energética em ETEs, assume que as estações podem ter uma economia de energia típica de 15% do consumo total, empregando apenas medidas básicas de eficiência energética e obtendo retornos rápidos sobre o investimento realizado, de 3 a 5 anos (NYSERDA, 2008). Avaliações mais detalhadas podem levar a uma economia de energia entre 10% e 50% do uso atual da estação (FOCUS ON ENERGY, 2016). Alguns exemplos podem alcançar economias de até 75% (HENRIQUES; CATARINO, 2017).

Já se sabe, entretanto, que a energia potencial disponível no esgoto bruto, pode ser mais que o suficiente para abastecer as necessidades de energia em uma ETE, dependendo do tipo de tratamento adotado e dos padrões de lançamento do efluente (WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007). Dessa forma, conhecendo todas as oportunidades de economia e dominando o processo de produção de energia, através da digestão anaeróbia, é possível tornar a estação autossuficiente em energia (i.e. produção de energia maior que o consumo total da estação) (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015; WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007). Como exemplo, pode ser citada a estação de tratamento de esgotos de Strass, na Áustria, que foi de 49% de autossuficiência em 1996 para 108% em 2005, ou seja, além de não depender de energia de fontes externas, ainda produz um excedente de 8% do total consumido (JONASSON, 2007).

Além de controlar e monitorar os processos de tratamento, outra medida importante para redução no uso de energia em uma ETE é a operação e manutenção das redes de coleta e transporte de esgotos, evitando a contribuição de águas parasitárias, que acaba diluindo o efluente e aumentando o consumo energético (LONGO et al., 2016; USEPA, 2013). Outra medida nesse sentido, seria a redução das descargas dos vasos sanitários, que da mesma forma, aumentam o volume a ser tratado e diluem o esgoto (JORDÃO, 2008).

3.3.3.1. Planejamento, implementação e operação

O consumo energético das estações de tratamento de esgotos deve ser considerado tanto na fase de projeto como operação das mesmas (TAO; CHENGWEN, 2012). A escolha do processo de tratamento influenciará fortemente na demanda energética das ETEs (JORDÃO, 2015). Estações que adotam processos anaeróbios seguidos por pós-tratamento aeróbio, por exemplo, tornam-se atraentes com relação ao consumo energético, uma vez que reduz o consumo per capita de energia e proporciona o aproveitamento do gás metano gerado na fase anaeróbia (JORDÃO, 2008). A Tabela 6, abaixo, mostra alguns indicadores de consumo energético para a aeração, evidenciando a diferença no consumo de energia para diferentes tipos de tratamento.

Tabela 6 - Indicadores de consumo de energia por processos de tratamento

Processo	Idade de Lodo (dias)	Energia para aeração (kWh/hab.ano)
Lodo ativado convencional	< 3	10 a 15
Lodo ativado convencional	4 a 7	18 a 22

Lodo ativado c/ nitrificação	10 a 14	25 a 35
Lodo ativado por aeração prolongada	18 a 30	33 a 37
Filtro biológico de alta taxa	-	-
Lagoa aerada de mistura completa	-	20 a 24
Lagoas de estabilização	-	-
UASB + Lodo ativado convencional	~ 7	~ 15

Fonte: (JORDÃO, 2008)

Deve-se levar em conta também na elaboração de uma ETE o planejamento para implantação do sistema como um todo, uma vez que os sistemas de tratamento de esgotos sanitários, em geral, são planejados para uma demanda futura de 20 a 30 anos (JONASSON, 2007). Com isso, se faz necessário um bom planejamento para implantação das unidades de tratamento. Para atender as demandas atuais e futuras, o ideal é projetar unidades menores e implementá-las aos poucos, de modo que a capacidade de tratamento da estação acompanhe o crescimento da rede e da vazão afluente à ETE (FOCUS ON ENERGY, 2016; JORDÃO, 2015). Tão importante quanto dimensionar corretamente as unidades de tratamento, é dimensionar os equipamentos para a demanda atual, ao invés de superdimensioná-los para as demandas futuras (FOCUS ON ENERGY, 2016; JONASSON, 2007). O bom planejamento e implantação pode acarretar em uma economia de 10% a 30% da energia consumida por unidade (FOCUS ON ENERGY, 2016). Nesse sentido, também se faz necessário um bom planejamento da ETE para atender variações sazonais, como em cidades turísticas por exemplo, onde na alta temporada o contingente populacional pode representar cerca de 10 vezes a mais que a população fixa ao longo do ano. (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010; FOCUS ON ENERGY, 2016).

A adoção de unidades de decantação primária para reduzir o consumo de energia também se demonstra eficaz, uma vez que sistemas sem essa etapa necessitam de muito mais energia para realizar a estabilização aeróbia da matéria orgânica (HENRIQUES; CATARINO, 2017; JONASSON, 2007; PANEPINTO et al., 2016). O dimensionamento adequado das tubulações, da mesma forma, pode levar a uma significativa economia energética, visto que as perdas de carga acentuadas exigem um alto consumo de energia (JONASSON, 2007).

Tão importante quanto o projeto da ETE, a operação também exerce um papel fundamental no consumo total da estação. É essencial, por exemplo, que as diretrizes operacionais estejam de acordo com o projeto da estação, assim como deve-se dispor de Manuais de Operação (JORDÃO, 2008). É necessário também que as medidas de manutenção preventiva sejam seguidas rigorosamente para que se atinja uma boa eficiência energética, principalmente nos equipamentos de maior consumo (JORDÃO, 2008).

A realização de mudanças operacionais podem aumentar consideravelmente a eficiência energética da estação, com pouco ou nenhum investimento e rápido retorno financeiro (LONGO et al., 2016; USEPA, 2013). Reduzir o uso de equipamentos em horários de tarifa de ponta de energia, por exemplo, pode trazer significativas economias financeiras (HENRIQUES; CATARINO, 2017; JORDÃO, 2008). Os horários de ponta, são aqueles compreendidos em um período de 3 horas diárias consecutivas onde a tarifa da energia se torna mais cara, variando conforme estabelecido por cada concessionária (ANEEL, 2010). Na área de concessão da CELESC, por exemplo, o horário de ponta, regulamentado pela Resolução Homologatória nº 1.322 de 31 de julho de 2012, ficou estabelecido entre as 18:30h e 21:29h, e no horário de verão, entre 19:30h e 22:29h.

Como exemplo desse subterfúgio, pode ser citado o caso da ETE Icaí, em Niterói (RJ). A estação, que possui um tratamento primário avançado com lançamento do efluente tratado por emissário submarino, tem seu maior gasto energético nas elevatórias afluente à estação e na de recalque do emissário. Para reduzir os gastos com o consumo de energia, portanto, adotou-se um tanque que estava desativado na estação como tanque pulmão, acumulando o efluente que chegava no período de ponta e bombeando nos períodos de tarifa fora de ponta. Com essa solução simples, o faturamento mensal de energia reduziu em 27%, se mostrando uma medida extremamente eficaz (JORDÃO, 2008).

3.3.3.2. Gestão de energia

Assim como uma boa operação e manutenção, para se ter um baixo consumo energético na estação é fundamental estabelecer um programa de gestão de energia (JORDÃO, 2008; NYSERDA, 2008). Para que isso seja possível, deve-se estabelecer um gerente de eficiência energética ou uma equipe para estruturar a implementação do programa (WETT;

BUCHAUER; FIMML, 2007). Deve-se ainda ter uma participação de todos do corpo gerencial e técnico, assim como uma capacitação dos gerentes e operadores (JORDÃO, 2008).

Para estações que visam aderir a programas dessa natureza, ações iniciais como levantamento de dados do consumo energético, análises e relatórios podem facilitar o processo (LONGO et al., 2016). Tal procedimento ajudará, por exemplo, a descobrir a unidade ou etapa com maior consumo de energia da estação (ENERWATER, 2015; LONGO et al., 2016). Com isso será possível definir também as medidas de melhoria de curto prazo, as quais geralmente não envolvem custos de investimento (WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007).

A ISO 50001 traz orientações para um bom gerenciamento de energia no ramo empresarial, especificando as condições para estabelecer, implementar, manter e melhorar um sistema de gestão de energia (LONGO et al., 2016). O padrão internacional permite o estabelecimento seguir uma abordagem sistemática para atingir a melhora contínua no consumo de energia (LONGO et al., 2016). Tal abordagem consiste no método iterativo conhecido como PDCA (Plan, Do, Check, Act; em português: Planejar, Fazer, Verificar, Agir), um processo circular focado na melhoria contínua ao longo do tempo (LONGO et al., 2016; USEPA, 2013). A

Figura 1 abaixo, apresenta uma visão geral do método PDCA.

Figura 1 - Método iterativo PDCA



Fonte: Adaptado de (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015)

O procedimento possibilita que a estação estabeleça metas e priorize as ações de economia de energia (Planejar), implemente práticas para atingir as metas (Fazer), monitore e meça as melhorias e economias financeiras (Verificar), e revise os progressos periodicamente e faça ajustes no programa (Agir) (LONGO et al., 2016). O método, quando bem aplicado, pode trazer benefícios como a identificação das oportunidades de economia, redução de custos e melhora do desempenho, maior controle operacional e até mesmo uma melhor imagem para a companhia (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015).

3.3.3.3. Sistema de aeração

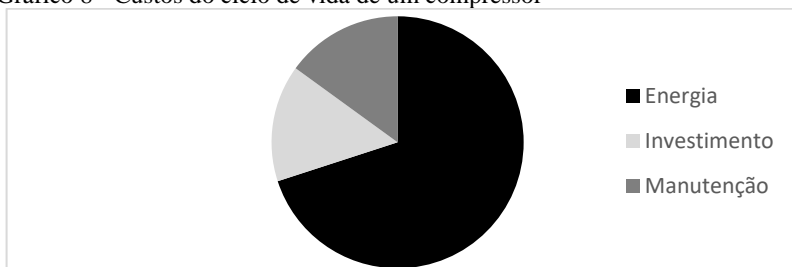
A etapa de aeração no processo de tratamento de esgotos é reconhecidamente a etapa de maior consumo energético (JONASSON, 2007; STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015). Ao mesmo tempo, e devido a isso, a aeração é a etapa que apresenta as maiores oportunidades para economia de energia (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010; HENRIQUES; CATARINO, 2017; JONASSON, 2007; LONGO et al., 2016). Com algumas alterações no sistema, tanto de caráter operacional e/ou de troca e melhoria dos equipamentos, é possível atingir uma redução de cerca 30% do consumo de energia total da estação (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015).

Visto que a carga orgânica afluente à ETE é variável, deve-se monitorar e ajustar a vazão de ar fornecida pelos equipamentos (JONASSON, 2007). Para tanto, faz-se o uso de sondas medidoras de Oxigênio Dissolvido (OD) no efluente, as quais monitoram em tempo real a concentração de oxigênio no tanque. Com o monitoramento e a adoção de sistemas automáticos de controle de oxigênio, é possível controlar o funcionamento dos sopradores e desligá-los, ou até mesmo diminuir a vazão de ar através de inversores de frequência, assim que os níveis de OD estiverem dentro do estabelecido nos procedimentos operacionais, evitando dessa forma o fornecimento excessivo de ar e alcançando economias significativas de energia (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010; FOCUS ON ENERGY, 2016; HENRIQUES; CATARINO, 2017; LONGO et al., 2016; NYSERDA, 2008; STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015; USEPA, 2013). Tal medida costuma apresentar bom custo benefício para estações novas de lodos ativados, já para substituição de sistemas existentes recomenda-se uma avaliação do ciclo de vida (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010). As economias em energia com essas medidas podem variar de 20% a 50% do consumo relativo à aeração (FOCUS ON ENERGY, 2016). Já

com relação ao consumo total da estação, as economias podem atingir cerca de 25% (NYSERDA, 2008).

A escolha do equipamento é essencial para se ter um baixo consumo energético na estação. Compressores com velocidade variável, por exemplo, podem reduzir significativamente o consumo de energia e ainda diminuir os custos do ciclo de vida do equipamento em 22% (IBERDROLA, 2012). Esses compressores, se comparados com os de velocidade fixa, podem trazer os retornos financeiros em apenas um ou dois anos (IBERDROLA, 2012). Como mostra o Gráfico 8 a seguir, a energia consumida pelo compressor durante um período de 10 anos, representa cerca de 70% do custo total do ciclo de vida do equipamento.

Gráfico 8 - Custos do ciclo de vida de um compressor



Fonte: Adaptado de (IBERDROLA, 2012)

Como pode ser visto, a escolha do equipamento é fundamental para redução de custos no ciclo de vida do mesmo. A substituição de sopradores antigos e ineficientes por equipamentos mais novos e com alta eficiência também é altamente recomendável, trazendo grandes economias à ETE (HENRIQUES; CATARINO, 2017; JONASSON, 2007; LONGO et al., 2016; NYSERDA, 2008; STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015; USEPA, 2013). As economias para esses casos podem representar por volta de 35% da energia da aeração ou cerca de 20% da energia total consumida na estação (NYSERDA, 2008).

Outra forma de economizar energia com a aeração do efluente, é a instalação dos difusores de bolhas finas, tanto para novas estações como para reforma de sistemas já existentes (FOCUS ON ENERGY, 2016; USEPA, 2013). Sistemas com bolhas finas, geralmente apresentam o melhor custo benefício para o ciclo de vida, variando a economia de energia dependendo da aplicação (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010). Tal vantagem se dá pelo fato das bolhas finas promoverem uma melhor transferência de oxigênio para a massa líquida do que as bolhas mais grossas

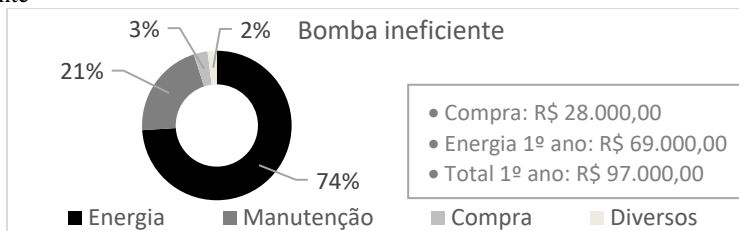
(EPRI, 2013). As bolhas finas ascendem mais devagar e proporcionam uma maior superfície de contato com o efluente, aumentando assim a transferência de oxigênio (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015). A instalação desses difusores pode gerar uma economia no consumo relativo a aeração de até 75% (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010). Quando comparado ao consumo total da estação, pode se obter uma economia de 20 a 25% da energia gasta (NYSERDA, 2008).

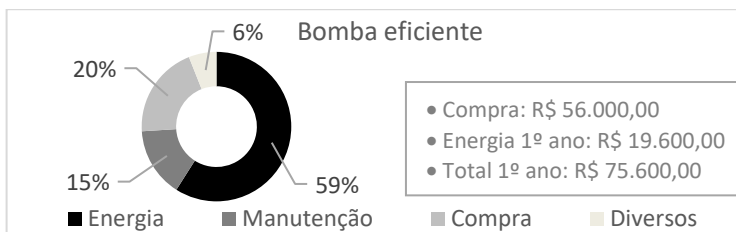
Nesses casos, devem ser previstos limpezas periódicas dos difusores, uma vez que os mesmos colmatam e aumentam significativamente o consumo de energia (FOCUS ON ENERGY, 2016). A limpeza frequente dos difusores pode reduzir em até 75% o consumo de energia da aeração (FOCUS ON ENERGY, 2016).

3.3.3.4. Motobombas e misturadores

As medidas para redução no consumo energético nas estações devido ao bombeamento, são extremamente importantes para reduzir o uso de energia e não representam uma área recente de inovação tecnológica (LONGO et al., 2016). As bombas, de modo geral, são grandes consumidoras de energia em ETEs, portanto é essencial para um baixo consumo energético que se compare diferentes equipamentos levando em conta suas eficiências (JONASSON, 2007). Se levado em conta o ciclo de vida dos equipamentos, em um horizonte de 10 anos, os custos operacionais dos motores elétricos podem exceder o custo de investimento em mais de 50 vezes (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010). A Figura 2 abaixo compara os custos do ciclo de vida entre uma bomba ineficiente e uma com boa eficiência energética.

Figura 2 - Comparação do ciclo de vida de uma bomba ineficiente com uma eficiente





Fonte: Adaptado de (EPRI, 2013)

Conforme visto na figura acima, as bombas eficientes podem ter um custo de ciclo de vida consideravelmente menor que as bombas ineficientes já no primeiro ano, compensando o alto valor de aquisição. Sendo assim, deve-se avaliar os equipamentos em operação e substituir os antigos e ineficientes por equipamentos novos e com boa eficiência energética (FOCUS ON ENERGY, 2016; JONASSON, 2007). As economias nesse sentido podem alcançar cerca de 5% a 10% do consumo de energia utilizado nos motores (FOCUS ON ENERGY, 2016).

Outra forma de conseguir economias significativas no consumo de energia, é a adoção de inversores de frequência (HENRIQUES; CATARINO, 2017; NYSERDA, 2008). O inversor ajusta a velocidade de rotação do motor para atender diferentes vazões, adequando seu funcionamento às cargas afluentes durante o dia e economizando energia (FOCUS ON ENERGY, 2016; HENRIQUES; CATARINO, 2017). A adoção dessa medida pode gerar economias no bombeamento de até 50% (EPRI, 2013). Em algumas estações a economia de energia total pode alcançar até 40% (FOCUS ON ENERGY, 2016).

Os misturadores também representam um importante consumo energético nas estações, portanto é imprescindível que se faça um dimensionamento adequado e se posicione os equipamentos de forma correta dentro dos tanques (JONASSON, 2007). Indica-se também a implantação de um sistema de controle online para os misturadores, podendo até mesmo desligá-los em determinados períodos sem afetar o tratamento (JONASSON, 2007).

3.3.3.5. Tratamento do lodo e aproveitamento de biogás

O tratamento e disposição final do lodo pode representar, em algumas estações, a maior parcela de consumo de energia (LONGO et al., 2016). Como exposto anteriormente na Tabela 3, o processamento do lodo, tipicamente, é considerado o segundo processo com maior gasto de energia, variando de 8% a 30% dos gastos energéticos de uma estação.

Para se reduzir o consumo de energia nessa etapa, deve-se de alguma forma reduzir o volume de lodo destinado ao tratamento (JONASSON, 2007). O deságue do lodo não só diminui o volume, e consequentemente a energia usada para bombeá-lo, como aumenta o teor de sólidos, fazendo com que se exija menos energia para o tratamento (JONASSON, 2007). Nesse sentido, o método mais econômico, com relação ao consumo energético, é o adensamento por gravidade, visto que praticamente não se precisa de energia e nem de adição de químicos (JONASSON, 2007). Outro fator importante é a temperatura do lodo, sendo que aumentando a temperatura do lodo afluente, é possível economizar grandes quantidades de energia (JONASSON, 2007).

O tipo de processo de tratamento do lodo vai implicar em diferentes escalas no consumo de energia. O tratamento através da digestão anaeróbia consome muito menos energia que a digestão aeróbia, primeiro por não demandar oxigênio para o processo e segundo por produzir menos lodo ao final do processo (NYSERDA, 2008). Além do mais, a digestão anaeróbia, que é um processo natural de degradação biológica onde os microrganismos depuram a matéria orgânica na ausência de oxigênio, produz, entre outros subprodutos, o biogás, o qual é uma fonte de energia capaz de ser transformado em energia térmica ou elétrica (SILVEIRA, B. et al., 2017; NYSERDA, 2008; STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015). Para aumentar a produção de biogás na digestão anaeróbia, algumas técnicas como pré-tratamento térmico ou uso de ultrassom já estão sendo estudadas (LONGO et al., 2016).

O biogás produzido no processo é uma mistura de gases constituído principalmente por metano e gás carbônico, sendo que sua composição depende das condições físico-químicas dentro do digestor (SILVEIRA, B. et al., 2017). O processo deve ocorrer dentro de determinada faixa de temperatura, podendo ser em condições mesofílicas (30 a 38°C) ou termofílicas (49 a 57°C), sendo o primeiro processo mais estável (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015).

O gás metano produzido tem grandes quantidades de energia e pode ser transformado em energia térmica ou elétrica através da cogeração (DESCOINS et al., 2012; JONASSON, 2007; USEPA, 2013). Essa energia gerada pode retornar para as etapas, tanto em forma de energia elétrica quanto energia térmica, podendo a estação alcançar assim a autossuficiência em energia (JONASSON, 2007). Sistemas de recuperação de energia, entretanto, geralmente fornecem cerca de 20% a 40% da energia utilizada em uma ETE de lodos ativados (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010).

3.3.3.6.Recomendações gerais e exemplos de eficiência energética

Além das medidas supracitadas, a estação deve levar em conta também outras fontes menores de consumo de energia. A melhoria da iluminação local, por exemplo, deve ser considerada, tendo em vista a maior iluminação natural, substituição das lâmpadas por outras mais eficientes e sensores que evitem o uso desnecessário das mesmas (CRAWFORD, G; SANDINO, 2010; USEPA, 2013).

Diversos exemplos de casos de sucesso em eficiência energética são encontrados na literatura. Na Suíça, por exemplo, a contínua análise energética das estações reduziu em média 38% do consumo total, sendo que 2/3 foram devido ao aumento da produção elétrica a partir do biogás, e 1/3 devido à eficiência energética (WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007). Na Alemanha foram encontradas oportunidades de economia energética maiores que na Suíça, sendo em média 50% do consumo total das ETES (WETT; BUCHAUER; FIMML, 2007).

Outro caso a ser citado é o das ETES de Strass e Wolfgangsee-Ischl, na Áustria. Ambas as estações são de lodos ativados e se tornaram autosuficientes em energia (ENERWATER, 2015). Elas operam com remoção de nutrientes, sendo a concentração de fósforo no efluente final fica bem abaixo de 1 mg/L e atinge cerca de 80% de remoção do nitrogênio (ENERWATER, 2015). As duas possuem unidade de decantação primária e utilizam difusores de bolhas finas no tratamento secundário, sendo, por fim, o lodo tratado através da digestão anaeróbia, em condições mesofílicas, e o biogás gerado encaminhado para cogeração (ENERWATER, 2015). A ETE de Strass, em 2009 e 2010, chegou a produzir em algumas ocasiões até 200% da demanda total da estação (ENERWATER, 2015).

No Brasil, além do caso já citado no item 3.3.3.1 da ETE Icarai, temos também o caso da ETE ABC, localizada em São Paulo (SP) e de responsabilidade da SABESP (SABESP, 2009). Foi realizado um levantamento do consumo de energia da estação e observou-se um alto consumo de energia por metro cúbico tratado (i.e. 0,601 kWh/m³). Foram tomadas então ações para que se reduzisse o consumo, sendo substituído os rotores de 2 sopradores, recuperado o tanque de aeração eliminando os vazamentos e implantado um sistema de controle automático através de medidor de OD e transmissores de pressão. Ao final do programa, a vazão afluente aumentou de 1.307 para 1.541 L/s e diminuiu significativamente o consumo de energia, indo de 2.065 para 1.411 MWh. Com isso, o consumo

específico da estação por volume de efluente tratado caiu para 0,354 kWh/m³ (SABESP, 2009).

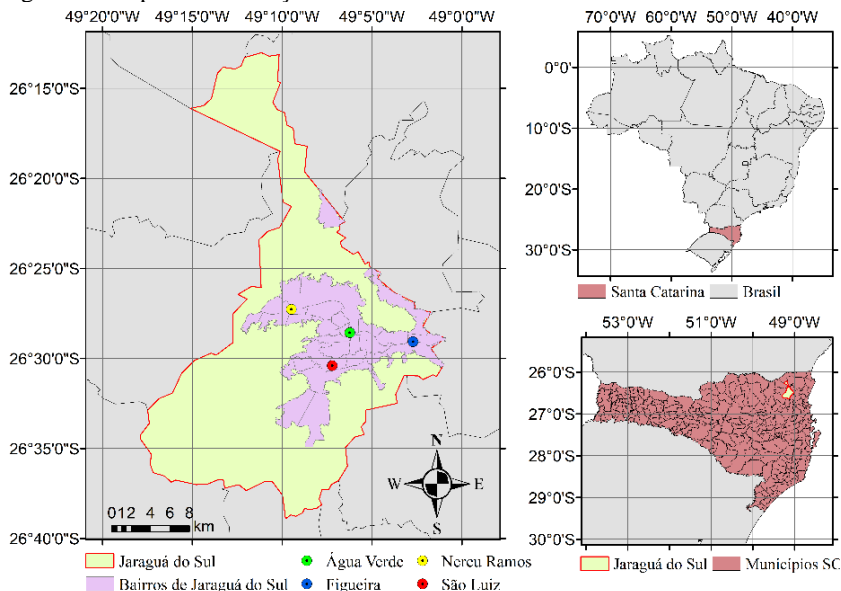
Com isso, podemos ver que as medidas de redução no consumo de energia podem alcançar valores expressivos. Portanto, considera-se imprescindível que as ETEs possuam algum programa ou planejamento para que se reduza o consumo dedicado ao tratamento, sem nunca afetar a qualidade do efluente final.

4. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS ETEs E DA ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho se baseia em um estudo de caso com quatro Estações de Tratamento de Esgotos, sendo elas: ETE Água Verde, Nereu Ramos, Ilha da Figueira e São Luís. As ETEs em questão ficam todas localizadas na cidade de Jaraguá do Sul e são operadas pela SAMAE do próprio município. A cidade de Jaraguá do Sul fica localizada na região do norte catarinense, na microrregião de Joinville, e possui uma área de cerca de 529,477 km². No último censo (2010), contava com uma população de 143.123 habitantes, sendo a nona cidade mais populosa do Estado. De acordo com o IBGE o município tem uma população estimada para o ano de 2017 de 170.835 pessoas. Jaraguá do Sul é considerada um importante polo industrial do estado e é conhecida como a “Capital Nacional da Malha”. O mapa de localização do município e das estações é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Mapa de localização

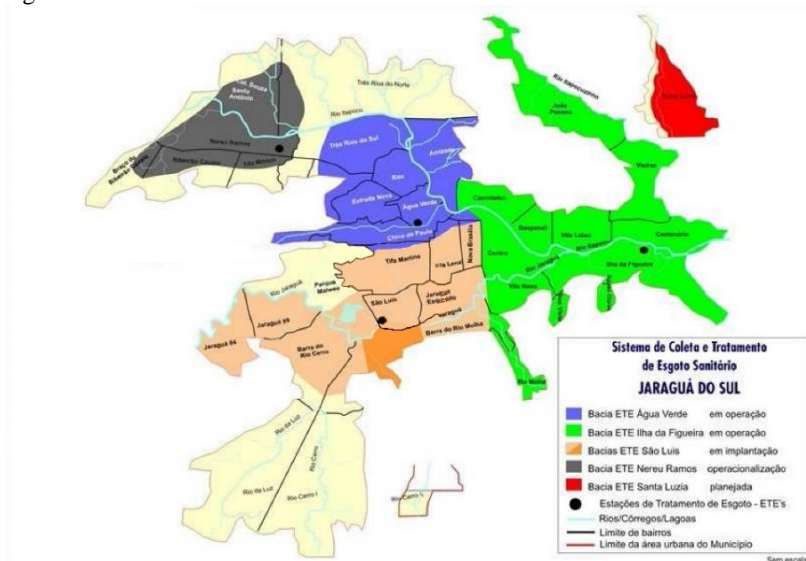


Fonte: Produção do autor

As quatro estações somadas tem capacidade para atender aproximadamente 141 mil habitantes. Contudo, de acordo com o IBGE de 2010 o

índice de coleta e tratamento de esgoto do município é de aproximadamente 87,6%. A Figura 4, a seguir, mostra a cobertura de coleta de esgoto destinado a cada estação, inclusive da ETE Santa Luzia, a qual ainda está em fase de planejamento e, portanto, não faz parte do estudo.

Figura 4 - Área de cobertura das ETEs



Fonte: Adaptado de AMPLA Consultoria e Planejamento (2010)

A seguir serão descritas as estações estudadas e seus respectivos processos de tratamento.

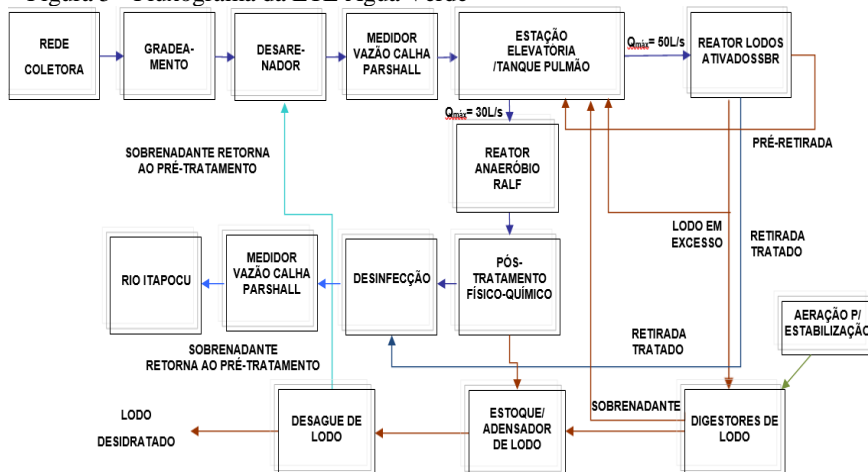
4.1.1. ETE Água Verde

A ETE Água Verde situa-se às margens da Rodovia Prefeito Engelbert Oechsler (BR-280), no bairro Água Verde, e nas coordenadas 26°28'34,27"S e 49°06'14,41"O. Segundo a SAMAE JS, os bairros atendidos pela ETE são: Três Rios do Sul, Rau, Amizade, Água Verde, Chico de Paulo e Estrada Nova.

A estação entrou em operação no ano de 2000 e passou por reformas para ampliação no início de 2015. A população a ser atendida, segundo o projeto, é de 32.000 habitantes com uma contribuição per capita de 125 L/hab.dia, resultando numa contribuição diária de 4.000 m³/dia (46,3 L/s). Como mostrado adiante, durante o período analisado a vazão diária média foi de 4.554,55 m³/dia (114% da capacidade) e a população equivalente

estimada foi de 32.234 habitantes, excedendo a capacidade de dimensionamento. A Figura 5 abaixo, apresenta o fluxograma da estação.

Figura 5 - Fluxograma da ETE Água Verde



Fonte: SAMAE Jaraguá do Sul (2016)

A ETE Água Verde conta com um sistema de tratamento em paralelo, dividindo a vazão entre um Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado (RALF) e um sistema de lodos ativados por batelada, ou Reator em Batelada Sequencial (RBS, ou ainda, SBR em inglês). O RALF tem capacidade para tratar eficientemente uma vazão de até 2.592 m³/dia, sendo o SBR projetado para atender uma vazão excedente de 1.408 m³/dia.

O tratamento preliminar é composto por gradeamento com limpeza mecanizada, desarenador tipo gravitacional e medidor de vazão tipo calha Parshall. O pré-tratamento conta também com um biofiltro para o tratamento dos gases odorantes.

Após, o efluente segue para uma estação elevatória onde é recalcado para os reatores RALF e SBR. A mesma é ligada por meio de vaso comunicante com um tanque de equalização, controlado através de comporta. Na elevatória estão instalados quatro conjuntos moto-bombas submersíveis, sendo dois deles para alimentar o RALF e os outros dois para o SBR. As bombas que mandam para o SBR funcionam de forma alternada e são acionados por conversores de frequência, podendo bombear em vazões pré-definidas de 16 L/s ou 50 L/s.

O tratamento biológico, como já mencionado, é dividido entre o RALF e o SBR, sendo que o primeiro trata uma vazão até 30 L/s e o outro uma

vazão de até 50 L/s. O Reator Anaeróbio opera com fluxo ascendente e possui formato retangular, com dimensões de 22,40 metros de largura e de comprimento e uma altura total de 5,70 m. Do RALF o efluente segue para o tratamento físico-químico antes de se juntar ao efluente do SBR para desinfecção. O tratamento físico-químico, por sua vez, é realizado através de coagulação química, floculação e decantação, com adição de cal em solução aquosa para correção do pH e cloreto férrico como coagulante, ambos através de bombas dosadoras.

O lodo em excesso do RALF e do tratamento físico-químico é encaminhado para uma elevatória e bombeado para o tanque de armazenamento e adensamento. Deste, o lodo segue bombeado para o desaguamento em prensa-parafuso.

O SBR, concebido para atender a vazão excedente, é totalmente automatizado e os processos podem ser regulados através dos parâmetros de tempo, nível, oxigênio dissolvido (OD) e sólidos suspensos totais (SST). O reator foi projetado com uma idade de lodo de 5 dias e possui um volume útil de 757,48 m³. A retirada do efluente tratado é realizada através de um vertedor com capacidade de 350 m³/h, controlado através da medição de SST, e só acontecendo caso o sensor indique uma concentração de sólidos suspensos totais menor ou igual ao estabelecido (no projeto definiu-se 30 mg SST/L). Caso contrário a válvula para retirada é fechada, interrompendo a retirada por 10 minutos e dando continuidade à decantação. Para a retirada do lodo em excesso, é utilizada uma bomba submersível.

O sistema de aeração é constituído por cinco aeradores submersíveis com aspiração de ar atmosférico. Três deles são de 30 cv cada e os outros dois de 20 cv cada, com uma capacidade de aeração estimada de 101,00 kg O₂/h para os cinco aeradores. O funcionamento deles está atrelado à medição de OD no interior do tanque, sendo que durante a madrugada os aeradores mantêm uma concentração de oxigênio dissolvido entre 2,0 e 2,5 mg/L e durante o dia (entre as 6h e as 24h) entre 1,5 e 2,0 mg/L. É utilizada essa estratégia pelo fato de o início da manhã ser o período do dia no qual normalmente ocorre um pico de vazão de esgoto entrando na ETE, sendo assim, dependendo da concentração de OD no interior do reator, um ou mais aeradores estarão em funcionamento, economizando assim grandes quantidades de energia e dinheiro na operação do sistema.

A desinfecção do efluente é realizada no tanque de contato através da adição de hipoclorito de sódio dosada através de bombas dosadoras no início do tanque. Depois do tanque de contato, o efluente final segue por gravidade para o Rio Itapocu, seu destino final.

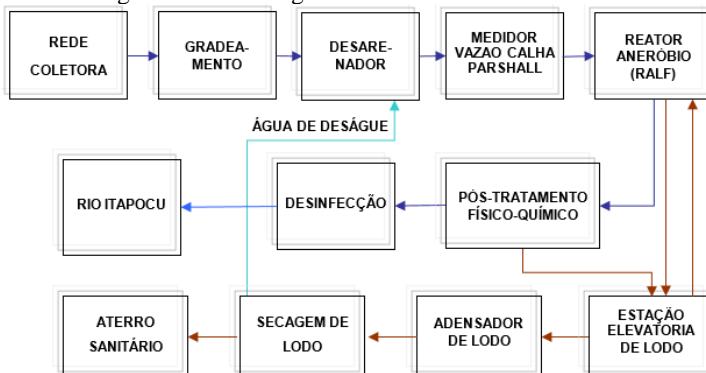
Está prevista no projeto uma vazão de lodo em excesso de 31,64 m³/dia, o que representa cerca de 263,58 kg SS/m³, sendo essa vazão bombeada durante aproximadamente 48 minutos por dia. Devido ao adensamento sofrido pelo lodo nos digestores, tem-se um volume diário de 8,78 m³ para ser estabilizado. O desague se dá por prensa parafuso com capacidade de até 1.100 kg/dia (em massa seca).

4.1.2. ETE Ilha da Figueira

A ETE Ilha da Figueira fica localizada na Rua José Panstein, às margens do Rio Itapocu, no bairro Figueira, e nas coordenadas 26°29'4,29"S e 49°02'43,16"O. Segundo a SAMAE, os bairros atendidos pela ETE são: Czerniewicz, Baependi, Vila Lalau, Ilha da Figueira, Boa Vista, Águas Claras, Vila Nova e Centro.

A estação está em funcionamento desde 2002 e foi projetada para atender uma população de 38.888 habitantes, com capacidade para tratar até 8.640 m³/d (100 L/s). Para fim de plano (2025), a ETE atenderá uma população de 77.775 e terá capacidade de tratamento para 200 L/s. No período analisado, a vazão diária média foi de 4.861,87 m³/d (56% da capacidade) e a população equivalente de 28.935 habitantes. A Figura 6, a seguir, apresenta o fluxograma da estação.

Figura 6 - Fluxograma da ETE Figueira



Fonte: Produção do autor. Baseado nas informações da SAMAE Jaraguá do Sul. (1998)

O processo de tratamento adotado para a estação é de nível terciário, assim como a ETE Água Verde, em virtude das exigências para o lançamento no Rio Itapocu. Foi utilizado para isso um tratamento anaeróbico

combinado com físico-químico e desinfecção com dióxido de cloro. A ETE não possui elevatória de esgoto bruto junto à estação.

O tratamento preliminar conta com um gradeamento fino com grades de barras, removendo materiais com dimensões superiores a 15 mm. Após, o efluente segue para desarenação, realizada em caixas de areia do tipo ciclônico com movimento de água em espiral e remoção de areia por injetor *air lift*. No fim do pré-tratamento o efluente passa por uma calha Parshall para medição da vazão afluente e controle da velocidade.

Para o tratamento primário adotou-se o sistema RALF, o qual opera com fluxo ascendente. O reator foi dimensionado para um tempo de detenção superior a 8 horas, tem uma profundidade de 4,5 m e dimensões laterais de 22 m. O lodo formado nessa unidade é removido periodicamente por uma tubulação, por meio de carga hidrostática, e segue para a estação elevatória de lodo, já o efluente segue para o tratamento secundário.

O tratamento secundário começa com a coagulação química que ocorre na calha Parshall após a saída do efluente do RALF. O efluente segue para os tanques de floculação que são divididos em 3 unidades. O primeiro tanque tem um gradiente de velocidade variando de 90 s^{-1} a 60 s^{-1} , o segundo de 60 s^{-1} a 30 s^{-1} e o terceiro variando de 30 s^{-1} a 10 s^{-1} . Somados os tempos de detenção, o efluente fica por cerca de 24,5 minutos em processo de mistura lenta. A floculação realizada é do tipo mecânica e acontece por meio de agitadores mecânicos tipo turbina axial. O efluente floculado segue então para a fase de decantação através de um canal, sendo que cada um dos dois módulos de decantação tem capacidade para 50 L/s. Cada módulo é constituído por 100 painéis de polipropileno e tem dimensões de 2,4 m de largura por 10 m de comprimento. O lodo formado nos decantadores é removido através de um canal localizado na parte inferior, encaminhando-o para a estação elevatória de lodos.

Após a decantação os efluentes tratados passam por processo de desinfecção com dióxido de cloro no tanque de contato, o qual opera através de chicanas verticais. O dióxido de cloro é gerado na estação através de dois geradores com capacidade de gerar 500 g/hora, sendo um deles de reserva. Após a desinfecção, o efluente segue para o destino final no Rio Itapocu.

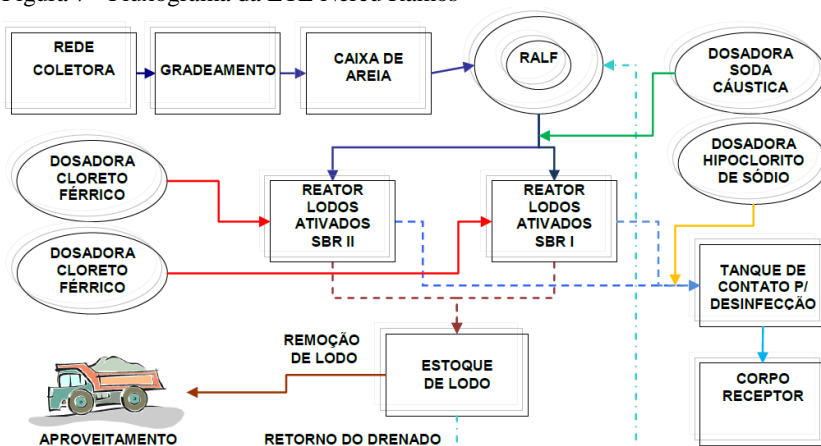
Parte do efluente gerado no processo é recirculado para o RALF e o excedente é bombeado, através da elevatória de lodo, para o adensador de lodo do tipo gravitacional. O lodo adensado é conduzido por bombeamento para a unidade de secagem de lodos, a qual é feita através de prensa-parafuso. O lodo seco é destinado ao aterro sanitário e a parte líquida retorna para o processo.

4.1.3. ETE Nereu Ramos

A ETE Nereu Ramos fica na Rua André Voltolini, bairro Nereu Ramos e coordenadas 26°27'16.60"S e 49°09'29.16"O. Os bairros atendidos pela ETE, segundo a SAMAE, são: Nereu Ramos, Ribeirão Cavallo, Tifa Monos, Santo Antônio, Braço do Ribeirão Cavallo.

A estação está em operação desde 2003 e passou por reformas para adequação no período de 2009 a 2010. A ETE foi dimensionada para atender 8.000 pessoas com uma contribuição per capita de 100 L/hab.dia. Somando a vazão de infiltração na rede, a ETE tem uma vazão diária média de projeto de 1.059,20 m³/dia (12,3 L/s). No período estudado a estação teve uma vazão diária média de 811,39 m³/dia (77% da capacidade) e uma população equivalente de 6.181 habitantes. A Figura 7 abaixo, apresenta o fluxograma da estação.

Figura 7 - Fluxograma da ETE Nereu Ramos



Fonte: SAMAE Jaraguá do Sul (2009)

O tratamento preliminar da estação é constituído por uma peneira estática, seguido por uma caixa desarenadora e uma calha Parshall. Após, o efluente segue para o tratamento primário, o qual é realizado no Reator Anaeróbico de Leito Fluidizado, e segue para o tratamento secundário controlado por válvulas guilhotina pneumáticas.

Para o tratamento secundário implantou-se o sistema de lodos ativados por batelada, utilizando 2 tanques de aproximadamente 395 m³ cada e operando com uma idade de lodo de 20 dias, o suficiente para estabele-

zação do lodo. A retirada do efluente tratado acontece por meio de vertedores flutuantes, enquanto a retirada de lodo é feita por bombeamento através de bomba submersível. A aeração é feita com 2 aeradores submersíveis por tanque, com potência de 20 cv cada. A ETE conta ainda com um compressor para acionamento dos atuadores de todas as válvulas pneumáticas instaladas.

A desinfecção do efluente é feita com hipoclorito de sódio em solução e dosado com bomba dosadora eletromagnética. Após a desinfecção o efluente segue por gravidade até o Rio Itapocu, seu destino final.

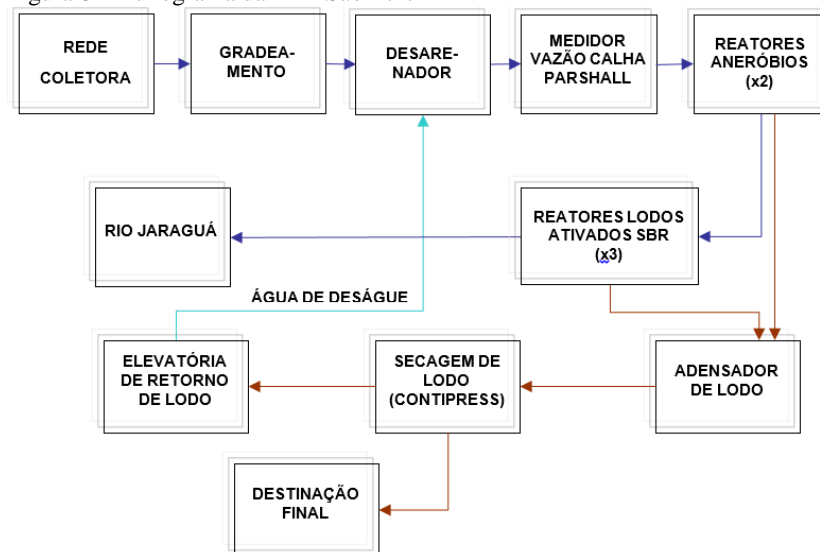
O lodo em excesso produzido nos reatores SBR é direcionado ao RALF com intuito de remover sua massa em cerca de 2/3. O lodo que é retirado então do Reator Anaeróbio e vai para a elevatória de lodo, sendo bombeado para dois tanques de fibra de vidro com 10.000 L cada, que servirão como estoque de lodo até ser encaminhado ao filtro prensa sob a responsabilidade da SAMAE de Jaraguá do Sul.

4.1.4. ETE São Luís

A ETE São Luís situa-se na Rua João Januário Ayroso, bairro Parque Malwee, e nas coordenadas 26°30'24.33"S e 49°07'12.82"O. Segundo a SAMAE, os bairros atendidos pela ETE são: Vila Lenzi, Nova Brasília, Jaraguá Esquerdo, São Luís, Tifa Martins, Barra do Rio Molha, Barra do Rio Cerro e Jaraguá 99.

A estação foi a última das quatro a entrar em operação, começando seus serviços no ano de 2016. A população a ser atendida, determinada no projeto, é de 70.000 habitantes com uma contribuição per capita de 134 L/hab.dia. Com a vazão de infiltração, a contribuição média diária de projeto é de 11.404,8 m³/dia (132 L/s). No período estudado a vazão diária média foi de 1.775,30 m³/dia (16% da capacidade) e uma população equivalente de 6.726 habitantes. A Figura 8 apresenta o fluxograma da estação.

Figura 8 - Fluxograma da ETE São Luís



Fonte: Produção do autor. Baseado nas informações da SAMAE Jaraguá do Sul. (2014)

O tratamento preliminar da ETE São Luís conta com gradeamento através de grade com limpeza automática, medidor de vazão tipo calha Parshall e caixa de areia gravitacional convencional.

O tratamento primário da estação foi projetado para acontecer em dois Reatores Anaeróbios com volume de 1.663 m³ cada, contudo até o momento apenas um dos reatores está recebendo efluente. Os reatores têm dimensões de 14 por 24 metros e altura de 5 metros, sendo seu tempo de detenção de aproximadamente 7 horas. Os reatores contam com dois misturadores submersíveis cada.

Do RALF o efluente segue para o tratamento secundário, o qual foi projetado em três reatores SBR com 3.000 m³ cada. Desses, apenas 2 estão em funcionamento até o momento. O processo de lodos ativados foi dimensionado com uma idade de lodo de 12 dias e uma profundidade dos tanques de 5 metros. A retirada do efluente tratado é feita por vertedores flutuantes e só começa quando a sonda acusa a concentração desejada no lodo sedimentado, já para a retirada do lodo foi instalada em cada reator uma bomba submersível. Também foram instalados dois misturadores submersíveis em cada SBR. O sistema de aeração é provido de 1086 membranas difusoras circulares por reator SBR e 4 sopradores de ar do tipo roots, sendo um para cada reator e um de reserva. Até o momento

apenas dois estão em funcionamento. Os sopradores instalados têm potência de 250 cv cada e funcionam na mínima potência recomendada pelo fabricante (i.e. metade da potência total) devido ao excesso de OD medido constantemente nos tanques. Após o processo de lodos ativados, o efluente final segue por gravidade até o Rio Jaraguá, rio classificado como de Classe 2.

Para o tratamento de lodo adotou-se o adensador de lodo por gravidade, o qual compõe-se de três câmaras em série, de forma quadrada e dimensões idênticas de 3,0 por 3,0 metros de largura e 3 metros de profundidade. Depois do adensador o efluente chega a uma quarta câmara (pulmão) separada, com intuito de se manter um fluxo contínuo de lodo para o sistema de deságue de lodo. Para tal, escolheu-se a prensa-parafuso dimensionada para uma vazão de lodo de 80,6 m³/d e teor de sólidos de 3%, sendo operado durante 12 horas por dia.

Por fim, a água de lavagem das caixas de areia, a água excedente do lodo adensado e a água de lavagem e filtrado da prensa-parafuso são encaminhadas para a elevatória de retorno. A elevatória possui dois conjuntos moto-bombas do tipo submersíveis com acionamento alternado, os quais bombeiam até a entrada do pré-tratamento.

4.2. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DAS ETEs ESTUDADAS

Com o intuito de avaliar a eficiência de remoção da matéria orgânica (através da DQO e DBO₅) nas ETEs analisadas, foram necessários os dados de vazão e as análises de qualidade do efluente, na entrada e saída, realizadas pela companhia de saneamento no período estudado. As vazões foram disponibilizadas para todas as ETEs avaliadas, já as análises de qualidade do efluente não foram possíveis de se obter somente para a saída da ETE São Luís, inviabilizando, com isso, a análise de eficiência de remoção de matéria orgânica para essa estação.

As vazões foram fornecidas com base nas médias mensais e estão apresentadas como médias diárias nos respectivos itens acima. Já as análises de qualidade do efluente cedidas se baseiam na média mensal das análises (amostragem simples) feitas uma vez por semana nas estações e realizadas no período de abril de 2016 a março de 2017.

Com essas informações foram calculadas as cargas de entrada e saída das estações, obtendo assim a eficiência de remoção de DQO e DBO₅ para cada mês analisado. A partir disso, calculou-se a média anual das eficiências de DQO e DBO₅ obtidas para cada mês.

4.3. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS ETES ESTUDADAS.

A avaliação da eficiência energética das Estações de Tratamento de Esgotos no presente trabalho foi realizada com base na norma alemã DWA-A 216 – Verificação e análise energética - Metodologias para a otimização energética de Estações de Tratamento de Esgoto. A escolha da referida norma se deu em virtude da falta de normativas brasileiras para o tema e por ser uma metodologia padronizada que já vem sendo utilizada em ETES. A DWA-A 216 pode ser aplicada tanto para sistemas de coleta e transporte de esgotos como para as estações de tratamento de esgotos.

A aplicação da norma se divide em duas etapas com diferentes graus de detalhamento e objetivos. A primeira etapa, a verificação energética, é uma avaliação de forma mais superficial utilizando poucos valores característicos, ou indicadores de desempenho. Recomenda-se aplicar essa etapa anualmente para determinar a necessidade de uma análise mais aprofundada e para acompanhar a evolução energética da estação ao longo do tempo, tornando possível compará-las com outras estações (benchmarking) e detectar possíveis desperdícios energéticos no processo.

A segunda etapa, análise energética, tem como objetivo o levantamento mais detalhado do consumo de energia da estação. Para isso, é necessário levar em conta as tecnologias de maquinário, processos e construção da ETE analisada. Para a realização do presente trabalho será aplicada apenas a primeira etapa da norma, a verificação energética.

O levantamento dos indicadores necessários para realização da verificação energética está apresentado na Tabela 7. A norma alemã permite que a verificação seja ampliada com outros valores característicos, conforme a disponibilidade de dados. Sendo assim, outros parâmetros serão levantados, além dos exigidos na norma.

Tabela 7 - Indicadores selecionados para a realização da verificação energética

Símbolo	Unidade	Descrição
E_{tot}^2	kWh/ano	Consumo total de energia elétrica por ano.
$EPT_{\text{DQO}, 110}^{1;2}$	hab.	Equivalente populacional total referente à DQO
Q_{tot}^3	m ³ /ano	Volume total tratado por ano
CA_{DQO}^2	kg DQO/ano	Carga afluyente de DQO por ano
$CA_{\text{DBO}_5}^3$	kg DBO ₅ /ano	Carga afluyente de DBO ₅ por ano
E_{aer}^2	kWh/ano	Consumo de energia elétrica da aeração do reator de lodo ativado.

Símbolo	Unidade	Descrição
C_{ee}^3	R\$/ano	Custo anual com energia elétrica

Legenda:

$$^1 EPT_{DQO,110} = \frac{CA_{d,DQO,aM} (kg DQO/d)}{0,110 (kg DQO/(hab.d))}$$

² Exigidos pela norma DWA-A 216.

³ Parâmetros não exigidos pela norma DWA-A 216.

Os dados foram fornecidos pela prestadora de serviços do município, SAMAE de Jaraguá do Sul, através das contas mensais de energia elétrica das estações, dos relatórios de análises mensais e dos dados operacionais registrados nas ETES. É importante salientar que a norma em questão indica a realização de amostragens compostas para obtenção das cargas médias, o que não ocorre nas estações estudadas.

Conforme recomendado pelo *Guia para aplicação da verificação energética conforme a norma DWA-A 216* (2014), elaborado pelo Consórcio AKUT e Rotária do Brasil, será utilizado um valor padrão para o cálculo de Equivalente Populacional Total de 110 g DQO/hab.d e não os 120 g/hab.d como especificado na própria norma. Tal mudança é necessária para se adequar às características brasileiras e possibilitar a comparação com outro estudo já realizado no Brasil.

O consumo energético do processo de aeração nas estações não é monitorado isoladamente. Sendo assim, utilizou-se os dados de potência dos equipamentos e os fornecidos pela prestadora para estimar o consumo de energia na aeração de cada uma das estações. Os dados necessários para estimar o consumo energético são: tempo de ciclo, tempo de nitrificação e potência do equipamento.

Para levantar a situação energética das ETES, serão utilizados sete indicadores de desempenho, os quais são apresentados na Tabela 8. Dependendo da disponibilidade de dados, pode-se obter outros valores característicos para as ETES.

Tabela 8 - Valores característicos da verificação energética

Símbolo	Unidade	Descrição	Fórmula
e_{EPT}^1	kWh/ (hab.a)	Consumo específico total de energia elétrica por habitante equivalente	$e_{EPT} = \frac{E_{tot}}{EPT_{DQO}}$
e_v^2	kWh/m ³	Consumo específico total de energia elétrica por volume de esgoto tratado	$e_v = E_{tot}/Q_{tot}$

Símbolo	Unidade	Descrição	Fórmula
e_{DQO}^2	kWh/ kg DQO _{rem}	Consumo específico total de energia elétrica por kg de DQO removida	$e_{DQO} = \frac{E_{tot}}{CA_{DQO}}$
e_{DBO5}^2	kWh/ kg DBO _{5rem}	Consumo específico total de energia elétrica por kg de DBO ₅ removida	$e_{DBO5} = \frac{E_{tot}}{CA_{DBO5}}$
$e_{aer,PE}^1$	kWh/ (hab.a)	Consumo específico de energia elétrica da aeração por habitante equivalente	$e_{aer} = \frac{E_{aer}}{EPT_{DQO}}$
$e_{aer,v}^2$	kWh/ m ³	Consumo específico de energia elétrica da aeração por volume de esgoto tratado	$e_{aer} = \frac{E_{aer}}{EPT_{DQO}}$
c_{ee}^2	R\$/ (hab.a)	Custo específico anual de energia elétrica	$c_{ee} = \frac{C_{ee}}{EPT_{DQO}}$

Legenda:

¹ Exigidos pela norma DWA-A 216.

² Parâmetros não exigidos pela norma DWA-A 216.

Por fim, é primordial que as medidas de otimização de energia na estação não prejudiquem a qualidade do efluente tratado. Segundo a DWA-A 216, já se demonstrou que em alguns casos a otimização energética da estação trouxe uma melhora na qualidade do efluente tratado, comprovando que esse aprimoramento no uso da energia não é necessariamente concorrente com a qualidade final do efluente tratado.

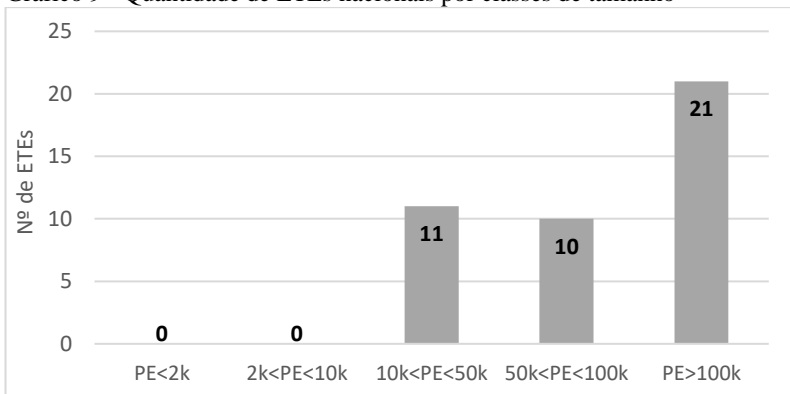
4.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA

Para realização do benchmarking faz-se necessário a utilização de bases de dados, a fim de que se possa comparar as estações avaliadas no com outras já existentes. Após a obtenção dos valores característicos das estações estudadas, as mesmas serão comparadas com as ETes encontradas em pesquisa.

Obteve-se, primeiramente, uma base de dados nacional através de um trabalho realizado pela Rotária do Brasil Ltda (no prelo). A pesquisa compreende 42 ETes com diversos arranjos tecnológicos e abrange 6 companhias de saneamento. São disponibilizados os valores característicos de e_{EPT} para todas as estações e de $e_{aer,PE}$ para apenas 7 delas, evidenciando a falta de monitoramento dos processos de forma isolada.

A população atendida por cada ETE no estudo nacional varia entre aproximadamente 11 mil e 1,17 milhão habitantes. O Gráfico 9 apresenta a quantidade de estações no estudo por faixa de população equivalente.

Gráfico 9 - Quantidade de ETEs nacionais por classes de tamanho



Fonte: Relatório interno da Rotária do Brasil LTDA (no prelo)

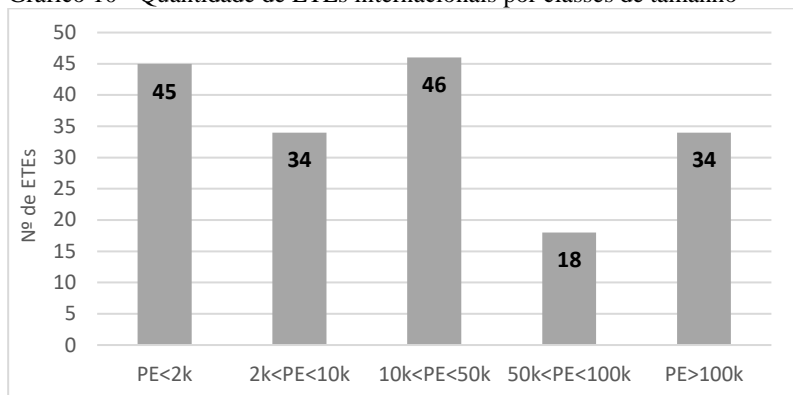
Foi utilizada também uma base de dados internacional, disponibilizada pelo projeto ENERWATER, publicado em seu próprio site no dia 29/02/2016. O projeto visa desenvolver, validar e disseminar uma metodologia para avaliar o consumo energético das estações de tratamento de esgotos e classificá-las de acordo com seu consumo.

A base de dados internacional possui informações retiradas de artigos científicos, relatórios técnicos, agências regionais e livros, apresentando em sua maioria dados agregados e em menor quantidade dados desagregados. Escolheu-se utilizar os valores característicos das referências que utilizam apenas uma estação, excluindo os valores para estudos com mais de uma ETE ou quando não havia informação sobre tal.

Dessa forma, foram utilizadas 177 ETEs como base de dados internacional, compreendendo 7 países europeus, Canadá, Japão, China e Estados Unidos. Os valores característicos disponíveis para todas as estações são o e_v e o e_{EPT} . O e_{DQO} está disponível para 172 e e_{DBO_5} para 86 delas. É possível obter também a eficiência de remoção de DQO e DBO_5 para 172 e 132 ETEs, respectivamente.

As populações atendidas por cada estação vão desde 19 até 2,13 milhões habitantes. O Gráfico 10 mostra a quantidade de estações por faixa de população atendida.

Gráfico 10 - Quantidade de ETEs internacionais por classes de tamanho



Fonte: ENERWATER (2016)

Ademais, serão utilizados os valores característicos encontrados em pesquisa bibliográfica relativa ao tema. Com a revisão foram obtidos diversos valores característicos para todos os apresentados na Tabela 8, com exceção do c_{ee} , dada a falta de informações e até mesmo pela dificuldade em comparar diferentes custos em diferentes regiões.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para levantar o consumo energético das ETEs da SAMAE JS, como mencionado no subcapítulo 4.2, foram fornecidas as contas mensais de energia elétrica. O consumo mensal das estações no período analisado se deu conforme apresentado na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Consumo de energia elétrica por estação (kWh)

Mês/Ano	ETE			
	Água Verde	Ilha da Figueira	Nereu Ramos	São Luís
04/16	38.556	4.463	17.731	20.734
05/16	39.927	5.697	15.546	21.636
06/16	39.909	5.875	14.068	20.577
07/16	39.365	6.073	15.204	19.588
08/16	41.420	5.620	15.251	25.736
09/16	45.450	5.938	15.502	28.390
10/16	46.631	6.643	16.170	33.514
11/16	42.071	6.693	20.474	34.124
12/16	43.360	5.724	19.715	34.175
01/17	46.855	6.362	21.430	35.568
02/17	38.454	6.857	16.530	44.734
03/17	43.075	6.276	16.474	47.856
Média	41.839,42	6.018,33	17.007,92	30.552,67
Total	502.073,00	72.220,00	204.095,00	366.632,00

O custo mensal relativo ao consumo de energia elétrica também foi levantado e é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Despesa com energia elétrica por estação (R\$)

Mês/Ano	ETE			
	Água Verde	Ilha da Figueira	Nereu Ramos	São Luís
04/16	19.776,91	2.890,77	10.620,77	14.214,94
05/16	20.423,16	3.333,29	8.991,84	14.155,04
06/16	21.163,16	3.421,50	7.986,47	14.003,01
07/16	20.120,80	3.234,54	8.171,57	13.482,93
08/16	20.929,47	2.885,69	8.062,47	15.335,96
09/16	21.839,29	2.991,00	7.975,00	16.769,05
10/16	22.538,50	3.477,66	8.551,78	19.663,54

Mês/Ano	ETE			
	Água Verde	Ilha da Figueira	Nereu Ramos	São Luís
11/16	21.018,41	3.511,20	11.371,00	19.373,89
12/16	20.555,62	2.917,01	10.578,63	19.184,37
01/17	22.549,64	3.260,74	11.314,33	19.878,98
02/17	19.090,95	3.501,30	8.860,88	25.228,61
03/17	21.715,76	3.326,49	9.014,11	25.887,24
Média	20.976,81	3.229,27	9.291,57	18.098,13
Total	251.721,67	38.751,19	111.498,85	217.177,56

Já o consumo energético do sistema de aeração não pôde ser medido, uma vez que não se monitora isoladamente tais equipamentos. Contudo, foi possível estimar o consumo através da potência dos equipamentos instalados (kW) e o tempo que eles funcionam por dia (h). Para determinar esse tempo de funcionamento, obteve-se o tempo de ciclo de cada sistema SBR e o tempo de nitrificação, período no qual os aeradores estão ligados. Com isso, estimou-se o consumo diário para a aeração de cada reator em kWh.

É importante salientar que apesar de os aeradores das ETes Água Verde e Nereu Ramos terem inversores de frequência, foi informado que durante o período analisado eles funcionaram com potência máxima, sem reduzir a rotação dos equipamentos. Os dados de funcionamento dos sopradores da ETE São Luís não foram possíveis de levantar, uma vez que a mesma se encontra em fase inicial de operação e já foram alteradas diversas vezes os ciclos de operação. Já a ETE Figueira não possui sistema de aeração.

A Tabela 11, abaixo, mostra o consumo estimado de energia elétrica mensal para a aeração de cada estação de tratamento e o percentual que ela representa em relação ao total de energia consumida da estação. Constatou-se que tanto na ETE Água Verde quanto na Nereu Ramos o consumo para aeração representou cerca de 84% do consumo total da estação, ficando dentro dos valores encontrados na bibliografia.

Tabela 11 - Estimativa do consumo energético mensal da aeração (kWh (%))

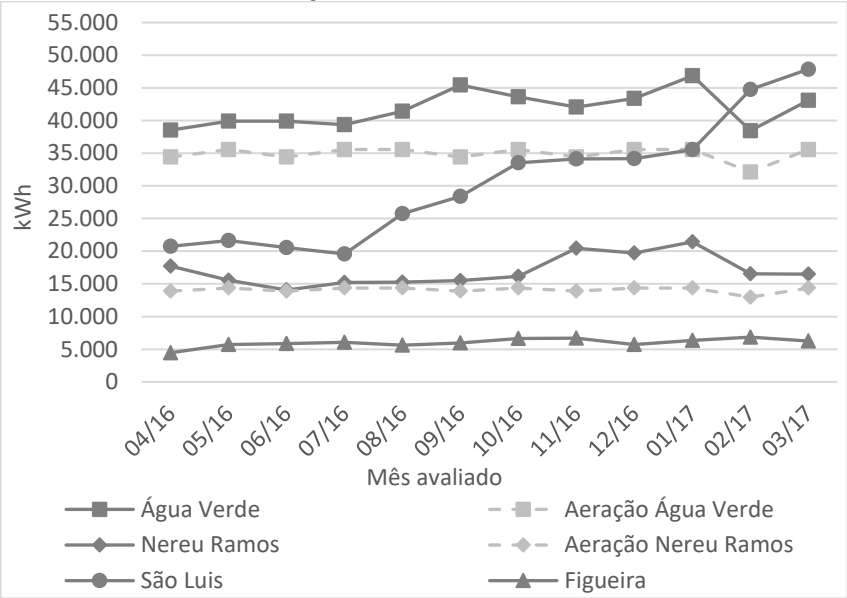
Mês/Ano	ETE			
	Água Verde	(%)	Nereu Ramos	(%)
04/16	34.421,34	89	13.900,95	78
05/16	35.568,72	89	14.364,32	92
06/16	34.421,34	86	13.900,95	99
07/16	35.568,72	90	14.364,32	94

Mês/Ano	ETE			
	Água Verde	(%)	Nereu Ramos	(%)
08/16	35.568,72	86	14.364,32	94
09/16	34.421,34	76	13.900,95	90
10/16	35.568,72	82	14.364,32	89
11/16	34.421,34	82	13.900,95	68
12/16	35.568,72	82	14.364,32	73
01/17	35.568,72	76	14.364,32	67
02/17	32.126,59	84	12.974,22	78
03/17	35.568,72	83	14.364,32	87
Média	34.899,42	84	14.094,02	84
Total	418.792,99		169.128,23	

Com os dados levantados, foi elaborado o

Gráfico 11 abaixo. O gráfico mostra a evolução no consumo de energia ao longo do período de estudo nas quatro estações de tratamento, de abril de 2016 a março de 2017. Observa-se que o consumo de energia da ETE São Luís cresce mais que o dobro durante o período. Isso se deve ao fato da estação ter entrado em funcionamento no dia 28 de março de 2016, sendo assim, levará alguns meses até que o tratamento e o consumo energético se estabilizem.

Gráfico 11 - Consumo de energia elétrica em cada ETE



5.2. VALORES CARACTERÍSTICOS

Para obter os valores característicos das estações, é necessário que se faça um levantamento dos dados operacionais das ETEs, conforme apresentado na Tabela 7. Os dados necessários foram levantados e estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados para verificação energética das ETEs (04/2016 a 03/2017)

Parâmetro	Unid.	ETE			
		Água Verde	Ilha da Figueira	Nereu Ramos	São Luís
Vazão média anual	m³/ano	1.660.368	1.774.869	296.130	646.948
Carga orgânica afluyente (DBO ₅)	kg/ano	641.310	627.188	118.824	216.658
Carga orgânica afluyente (DQO)	kg/ano	1.294.192	1.161.731	248.151	270.035
Habitante equivalente ¹	HE	32.234	28.935	6.181	6.726
DBO ₅	kg/	550.369	548.077	112.020	-

removida	ano				
DQO removida	kg/ano	1.067.445	963.865	219.256	-
Consumo de energia total	kWh/ano	502.073	72.220	204.095	366.632
Consumo de energia aer.	kWh/ano	418.793	-	169.128	-
Custo com energia	R\$/ano	251.721,67	38.751,19	111.498,85	217.177,56
Sistema de aeração	-	Aerador	-	Aerador	Difusor
Eficiência remoção DBO₅	%	85,2	87,3	94,3	-
Eficiência remoção DQO	%	80,5	82,7	85,4	-

¹ 110 g DQO/hab.dia

A partir dos dados levantados chegou-se aos valores característicos das estações de tratamento de esgotos da SAMAE de Jaraguá do Sul, entre o período de abril de 2016 a março de 2017. O valores são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores característicos das ETEs da SAMAE JS

Valor Característico	Unidade	ETE			
		Água Verde	Ilha da Figueira	Nereu Ramos	São Luís
e _{EPT}	kWh / hab.ano	15,58	2,50	33,02	54,51
e _v	kWh / m ³	0,302	0,041	0,689	0,567
e _{DQO}	kWh / kg DQO _{rem}	0,47	0,07	0,93	-
e _{DBO5}	kWh / kg DBO _{5rem}	0,91	0,13	1,82	-
e _{aer,PE}	kWh / hab.ano	12,99	-	27,36	-
e _{aer,v}	kWh / m ³	0,252	-	0,571	-
e _{aer,DQO}	kWh/kg DQO _{rem}	0,392	-	0,771	-
c _{ee}	R\$ / hab.a	7,81	1,34	18,04	32,29

Vale ressaltar que os consumos de energia referente aos sistemas de aeração das estações foram estimados, portanto não representam fielmente a realidade. Outro ponto importante é a forma de monitoramento dos parâmetros analisados, a qual é indicada pela norma alemã DWA-216 A que se faça através de amostragem composta, premissa essa não atendida pela companhia de Jaraguá do Sul.

Pelos indicadores obtidos, fica claro que a escolha do processo de tratamento afeta significativamente o consumo de energia elétrica. A ETE

Figueira, por não possuir sistema de aeração, gasta muito menos energia elétrica que as outras, contudo o gasto com produtos químicos e outros tipos de energia é muito maior. Já entre as três estações com processo de Lodos Ativados, percebe-se que a ETE Água Verde é a mais eficiente energeticamente em todos os indicadores. A ETE Nereu Ramos é a segunda mais eficiente, entre as que possuem sistema de aeração, tendo desempenho melhor que a São Luís nos valores de e_{EPT} e c_{ee} . Já para e_v a ETE São Luís é mais eficiente que a Nereu Ramos.

5.3. COMPARAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

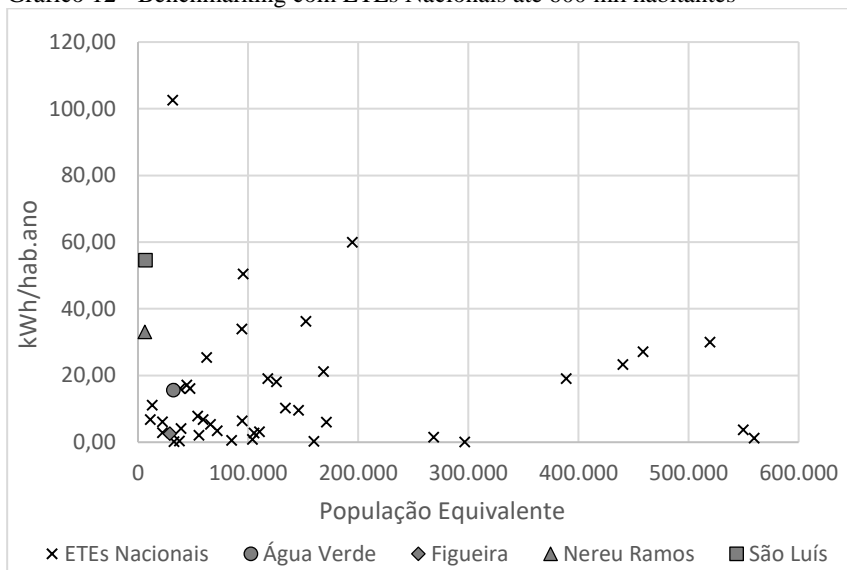
5.3.1. Benchmarking Nacional

A partir dos valores característicos obtidos, foi possível comparar as ETEs com outras já avaliadas. Nesse primeiro momento será feita uma comparação com um estudo já realizado no Brasil, conforme mencionado na metodologia.

O primeiro benchmarking foi feito com todas as estações até 600 mil habitantes, excluindo apenas uma com 1.172.497 habitantes em virtude da diferença em escala das estações. Com relação ao consumo de energia por habitante equivalente e considerando as 45 ETEs (41 do estudo e as 4 da SAMAE JS) avaliadas, a ETE Ilha da Figueira é a 10^a com melhor eficiência energética por habitante equivalente, ficando entre as estações que não possuem sistemas de Lodos Ativados. A estação mais eficiente da lista possui um sistema de RALF com Leito de Secagem, atende cerca de 296.757 habitantes equivalentes e possui um valor característico de 0,06 kWh/hab.ano.

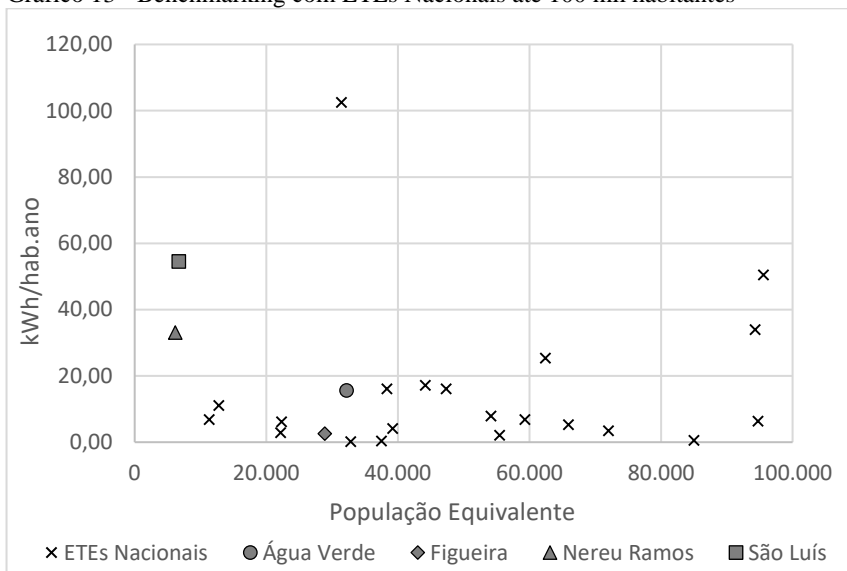
Nessa lista, a ETE mais eficiente com sistema de Lodos Ativados fica em 23^o lugar, com 7,82 kWh/hab.ano. A ETE Água Verde aparece na 27^a posição, a Nereu na 39^a e a São Luís em antepenúltimo, no 43^o lugar. Foi elaborado o Gráfico 12 com as 45 estações, destacando as ETEs da SAMAE JS.

Gráfico 12 - Benchmarking com ETEs Nacionais até 600 mil habitantes



Comparou-se também com estações até 100 mil habitantes, a fim de se evitar as diferenças obtidas em escalas diferentes de tratamento. Nesse caso, das 25 ETEs (21 do estudo e 4 da SAMAE JS) avaliadas, a ETE Figueira ficou em 5°, a Água Verde em 16°, a Nereu Ramos em 21° e a São Luís em penúltimo. A ETE de menor consumo tem um sistema de Lagoas Australiano (Lagoa Anaeróbia seguida por Lagoa Facultativa), atende uma população de 32.851 habitantes e tem um indicador de desempenho de 0,11 kWh/hab.ano. Já a estação de maior consumo energético possui um sistema de Lodos Ativados com remoção biológica de nutrientes, atende uma população de 31.467 habitantes e tem um valor característico de 102,50 kWh/hab.ano. Essa comparação pode ser vista no Gráfico 13.

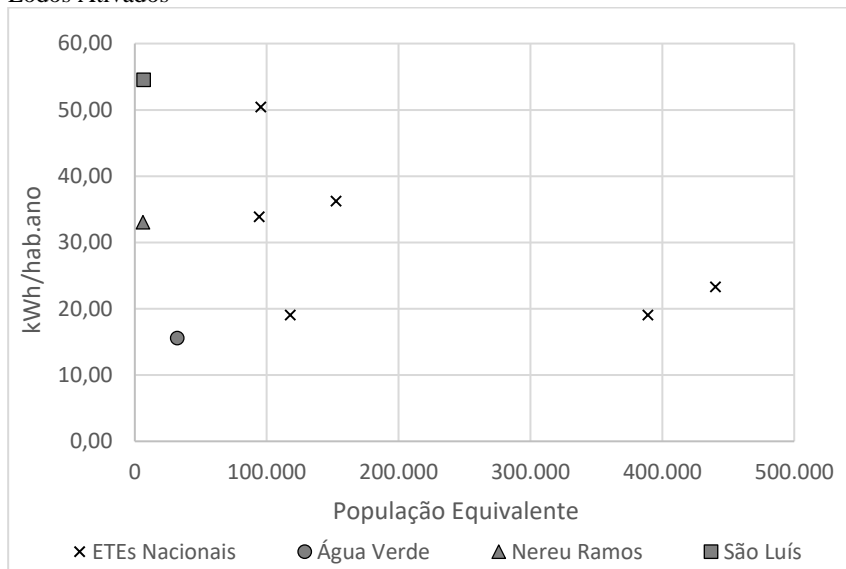
Gráfico 13 - Benchmarking com ETEs Nacionais até 100 mil habitantes



Além das diferenças em tamanho levou-se em conta também os tipos de tratamento adotados. Dessa forma, selecionou-se apenas as estações que adotam tratamento anaeróbio e algum tipo de Lodos Ativados no processo. Foram levantadas 6 estações com esse critério, independente da população atendida, além das ETEs Água Verde, Nereu Ramos e São Luís.

Entre elas, a mais eficiente é a ETE Água Verde, ficando à frente de uma estação com UASB e Lodos Ativados para 117.821 habitantes e um valor característico de 19,01 kWh/hab.ano. A menos eficiente é a ETE São Luís, atrás de uma estação também com UASB e Lodos Ativados, mas para 95.589 pessoas e com valor característico de 50,43 kWh/hab.ano. A ETE Nereu Ramos ficou na 5ª posição da lista. O Gráfico 14 mostra a comparação.

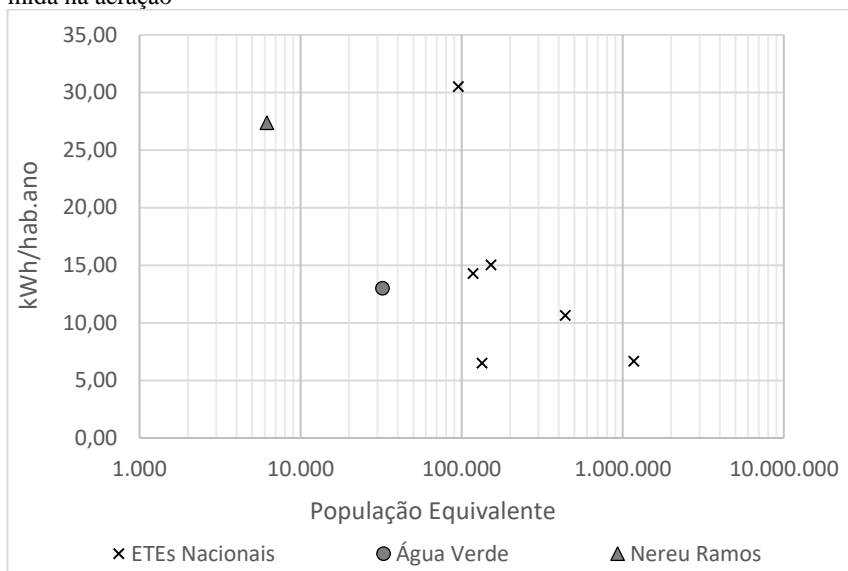
Gráfico 14 - Benchmarking com ETEs Nacionais com Tratamento Anaeróbio + Lodos Ativados



Por fim, a última comparação entre as ETEs Nacionais será com relação a energia consumida na aeração. Das 46 ETEs, 21 possuem alguma etapa aerada no processo, dessas, apenas 6 possuem informações sobre a quantidade de energia consumida na etapa de aeração. Com as ETEs Água Verde e Nereu Ramos, totalizam 8.

A ETE mais eficiente no processo de aeração tem um valor característico 6,49 kWh/hab.ano e possui um tratamento com UASB seguido por flotação com ar dissolvido. A estação com Lodos Ativados mais eficiente no quesito ficou em 2º, sendo ela uma ETE de Lodos Ativados Convencional para 1.172.497 de habitantes e com um consumo de 6,67 kWh/hab.ano para aeração. A ETE Água Verde ficou na 4ª posição enquanto a Nereu Ramos ficou em penúltimo. O Gráfico 15, semi-log, apresenta essa comparação.

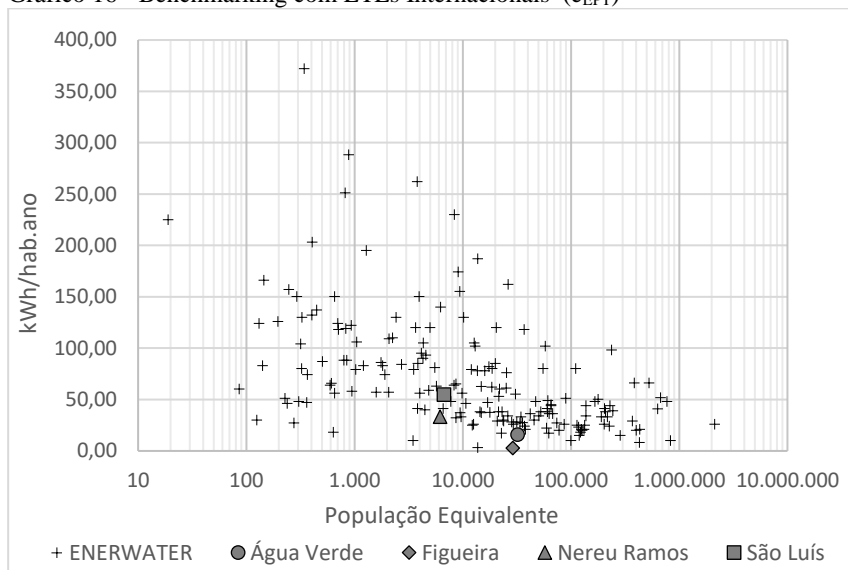
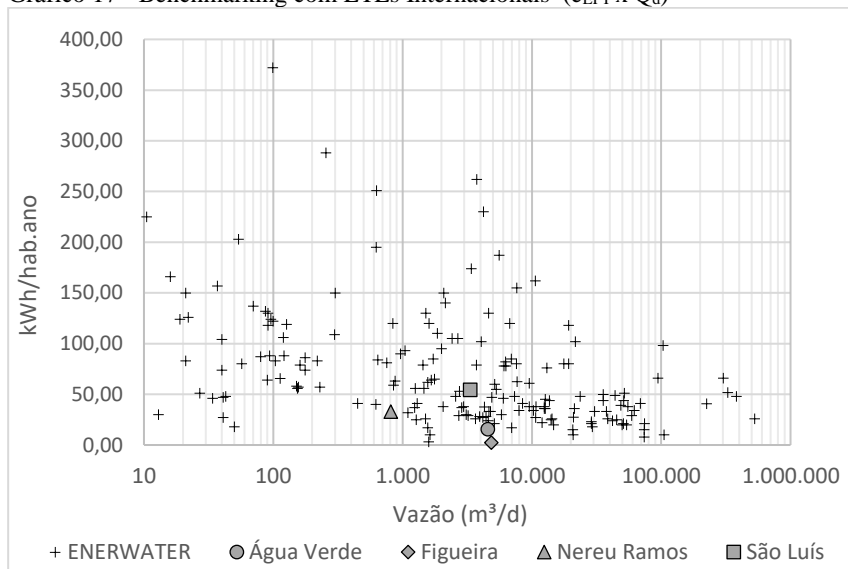
Gráfico 15 - Benchmarking com ETEs Nacionais com relação à energia consumida na aeração



5.3.2. Benchmarking Internacional

Para a comparação com estações de tratamento internacionais, foi utilizada uma base de dados fornecida pelo projeto ENERWATER (2016). Foram levantadas 181 estações com valores para e_{EPT} , considerando as quatro ETEs da SAMAE JS. A mais eficiente para esse indicador de desempenho foi a ETE Figueira. Isso se deve ao fato de ser a única, salvo 9 ETEs com tratamentos não especificados, a não ter processo de aeração em alguma etapa do tratamento. Em 9º na lista desse indicador está a ETE Água Verde, em 50º a ETE Nereu Ramos e em 92º a São Luís. O Gráfico 16 mostra os valores característicos encontrados com relação ao número de habitantes equivalentes.

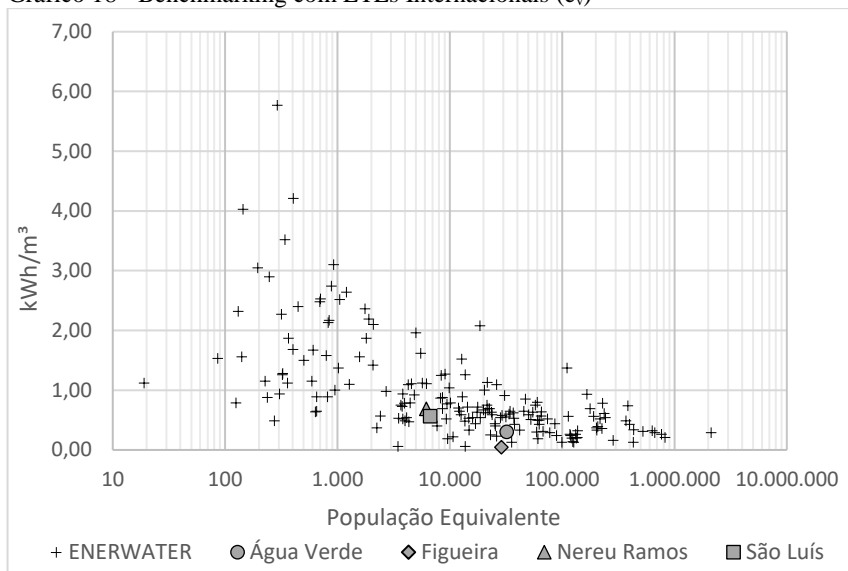
Para efeito de comparação foi feito o mesmo gráfico (Gráfico 17), mas com a vazão diária média no eixo das abscissas. Para o restante dos gráficos nesse capítulo será utilizado a população equivalente no eixo X, ao invés da vazão, por se considerar mais adequado esse parâmetro.

Gráfico 16 - Benchmarking com ETEs Internacionais (e_{EPT})Gráfico 17 - Benchmarking com ETEs Internacionais ($e_{EPT} \times Q_d$)

Igualmente, foram encontrados 181 valores para o indicador e_v , somando com as quatro ETEs da SAMAE JS. A ETE Figueira novamente

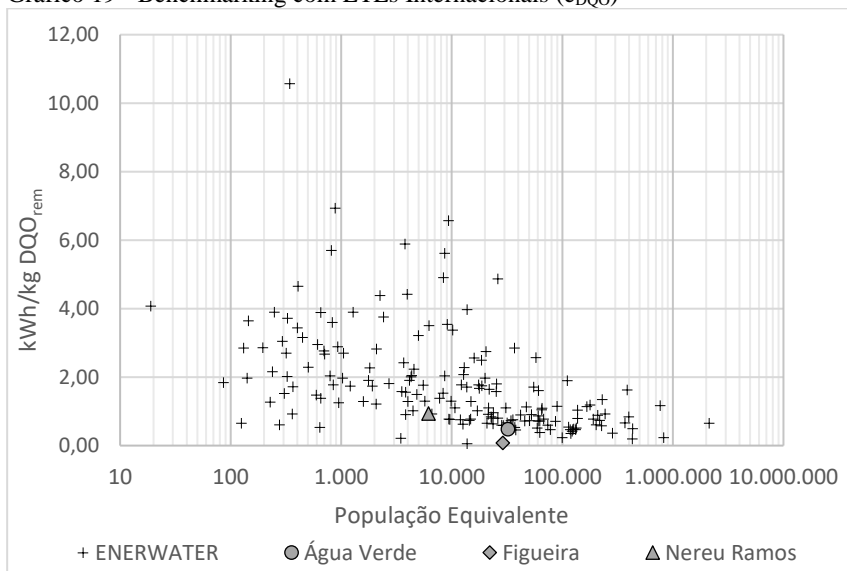
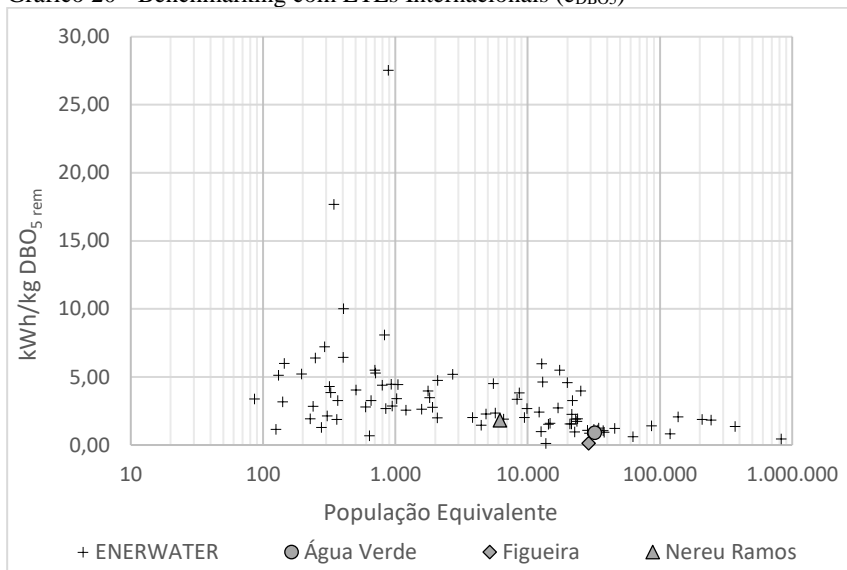
foi a mais eficiente para esse valor característico, pelo mesmo motivo supracitado. A ETE Água Verde foi a 28ª mais eficiente, a ETE São Luís a 72ª, e a Nereu Ramos a 94ª. Abaixo, a comparação no Gráfico 18.

Gráfico 18 - Benchmarking com ETEs Internacionais (e_v)



Para o indicador e_{DQO} estão disponíveis dados para 172 estações do projeto ENERWATER, enquanto entre as ETEs da SAMAE JS somente a São Luís não foi possível obter informações a respeito, totalizando 177 ETEs para comparação. Dessas, a estação mais eficiente fica localizada na Espanha, atende 13.755 habitantes equivalentes, com um sistema de lodos ativados com aeração prolongada e tem valor de 0,05 kWh/kg DQO_{rem} . Em segundo lugar aparece a ETE Figueira, em 16º a ETE Água Verde e em 67º a Nereu Ramos. O Gráfico 19 mostra os valores característicos obtidos em função da população atendida.

Já o indicador e_{DBO_5} possui apenas 86 referências nesse banco de dados, mostradas no Gráfico 20. Assim como para e_{DQO} , a ETE São Luís também não possui esse indicador, totalizando 89 ETEs. A mais eficiente para esse indicador é a mesma ETE mencionada para e_{DQO} , e, igualmente, a ETE Figueira está na 2ª posição. A estação Água Verde foi a 8ª mais eficiente e a Nereu Ramos a 28ª.

Gráfico 19 - Benchmarking com ETEs Internacionais (e_{DQO})Gráfico 20 - Benchmarking com ETEs Internacionais (e_{DBO5})

Considera-se também muito importante para essa discussão avaliar a eficiência em remoção de matéria orgânica nas ETEs. Para isso foi elaborado um gráfico (Gráfico 21) com os valores de e_{EPT} em função da eficiência de remoção de DQO e outro (Gráfico 22) em função da eficiência de remoção de DBO_5 . Para remoção de DQO foram encontrados 175 valores, já para DBO_5 foram encontrados 135.

Em ambos os gráficos é possível ver uma certa tendência de maior eficiência energética nas ETEs com maior remoção de matéria orgânica. No quesito remoção de DQO, a estação mais eficiente, que atende 447 habitantes equivalentes, possui tratamento por lodos ativados convencional e removeu 99,61%, com um valor para o indicador e_{EPT} de 137 kWh/hab.ano. Entre as ETEs da SAMAE JS, a primeira a aparecer na lista é a Nereu Ramos, em 157º lugar. A ETE Figueira ficou na 161ª posição e a Água Verde na 166ª. Não foi possível obter os dados da estação São Luís.

Para a remoção de DBO_5 , a mais eficiente teve uma eficiência de 99,58%, possui um tratamento por lodos ativados com aeração prolongada, atende 709 habitantes e tem um valor característico de 118 kWh/hab.ano. A ETE Nereu Ramos, mais eficiente da SAMAE JS, está na 102ª posição, enquanto a Figueira está na 126ª e a Água Verde na 129ª.

Gráfico 21 - Benchmarking com ETEs Internacionais (efic. remoção de DQO)

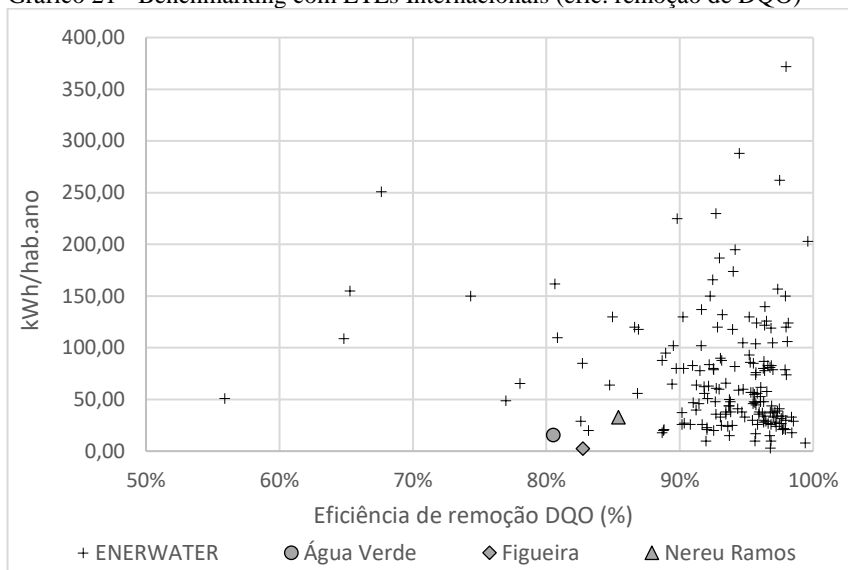
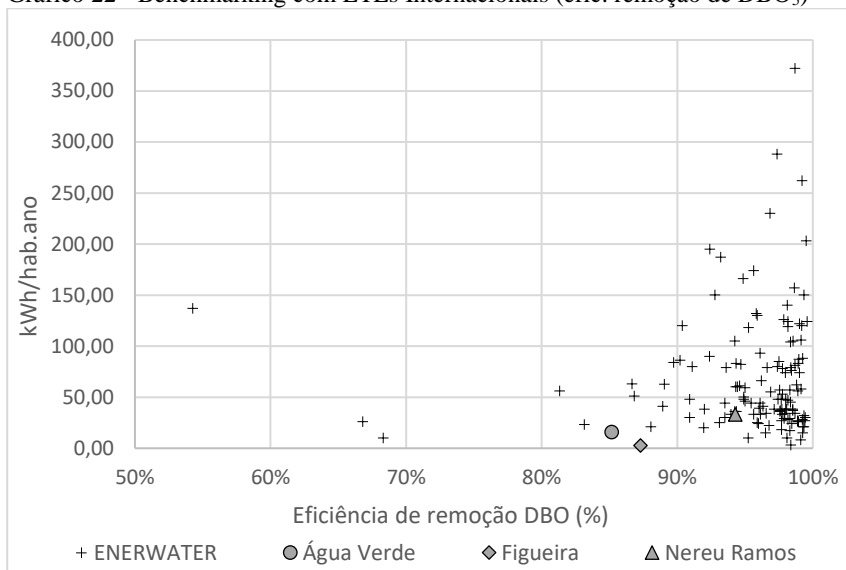


Gráfico 22 - Benchmarking com ETEs Internacionais (efic. remoção de DBO₅)

De forma resumida, o desempenho para cada indicador com relação às estações abordadas na base de dados do projeto ENERWATER (2016), está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Resumo do desempenho dos indicadores com relação aos dados do ENERWATER

ETE	e _{EPT}	e _v	e _{DQO}	e _{DBO5}	DQO _{rem}	DBO _{5 rem}
Água Verde	9°	28°	16°	8°	166°	129°
Ilha da Figueira	1°	1°	2°	2°	161°	126°
Nereu Ramos	50°	72°	67°	28°	157°	102°
São Luís	92°	94°	-	-	-	-
Total ¹	181	181	177	89	175	135

Legenda:

¹ Número total de ETEs incluindo as da SAMAE de Jaraguá do Sul;

e_{EPT} - Consumo específico total de energia elétrica por habitante equivalente;

e_v - Consumo específico total de energia elétrica por volume de esgoto tratado;

e_{DQO} - Consumo específico total de energia elétrica por kg de DQO removida;

e_{DBO5} - Consumo específico total de energia elétrica por kg de DBO5 removida.

Também foram analisados os indicadores de desempenho de forma estatística. Para isso, foram calculados a partir da base de dados os quartis

(1º e 3º quartil), a mediana e os máximos e mínimos para cada valor característico, incluindo os outliers¹, ou valores aberrantes. Optou-se dessa forma pela variedade dos dados fornecidos e por já ser encontrado assim na literatura (ENERWATER, 2015; FOCUS ON ENERGY, 2016; LONGO et al., 2016).

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados apenas para os indicadores e_v e e_{EPT} , uma vez que só se tem esses indicadores para toda as ETEs da SAMAE JS. Os outros resultados serão apresentados no Apêndice A. A Tabela 15 mostra os valores característicos para os indicadores citados, assim como as eficiências em remoção de DQO e DBO₅.

Tabela 15 – Valores característicos para benchmarking internacional

ETE	e_v	e_{EPT}	DQO _{rem}	DBO _{5 rem}
Água Verde	0,302	15,58	80,5%	85,2%
Ilha da Figueira	0,041	2,50	82,7%	87,3%
Nereu Ramos	0,689	33,02	85,4%	94,3%
São Luís	0,567	54,51	-	-

Legenda:

e_{EPT} - Consumo específico total de energia elétrica por habitante equivalente;

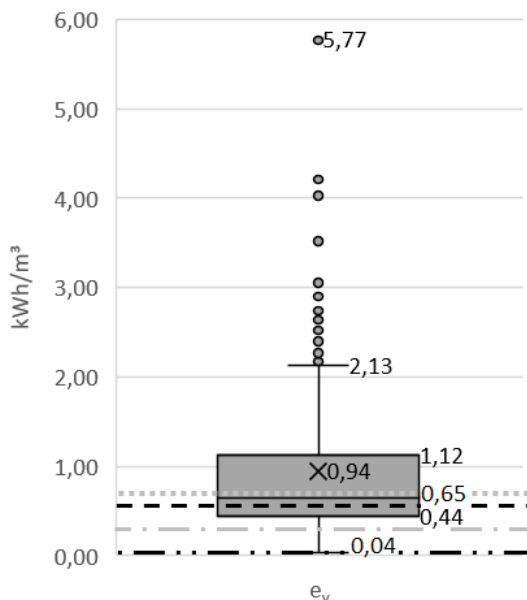
e_v - Consumo específico total de energia elétrica por volume de esgoto tratado.

Uma das formas de se fazer benchmarking, entre outras, é utilizar como meta os valores dos indicadores de desempenho dos melhores 25%. (FOCUS ON ENERGY, 2016). No caso dos valores característicos, os melhores 25% é o primeiro quartil e no caso da eficiência de remoção de DQO e DBO₅, o terceiro. Para analisar os valores, foram elaborados gráficos do tipo boxplot com os valores estatísticos calculados. Para efeito de comparação, os valores característicos das estações da SAMAE JS estão representados por linhas horizontais.

Para o indicador e_v foi elaborado um boxplot, apresentado no Gráfico 23. Percebe-se que a melhor eficiência para esse indicador foi da ETE Figueira. A Água Verde teve um ótimo desempenho nesse indicador, ficando entre o mínimo e o primeiro quartil, já a ETE São Luís ficou entre a mediana e o 1º quartil. A estação Nereu Ramos, por sua vez, teve o pior desempenho entre as quatro, ficando um pouco acima da mediana, mas ainda assim, com performance acima da média (0,94 kWh/m³). Ainda, foram encontrados 18 outliers para esse indicador, sendo todos acima do máximo de 2,13 kWh/m³.

¹ São valores que destoam excessivamente, para mais ou para menos, dos valores normais de uma amostra. (OLIVEIRA, 2008)

Gráfico 23 - Boxplot com valores estatísticos de e_v e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS

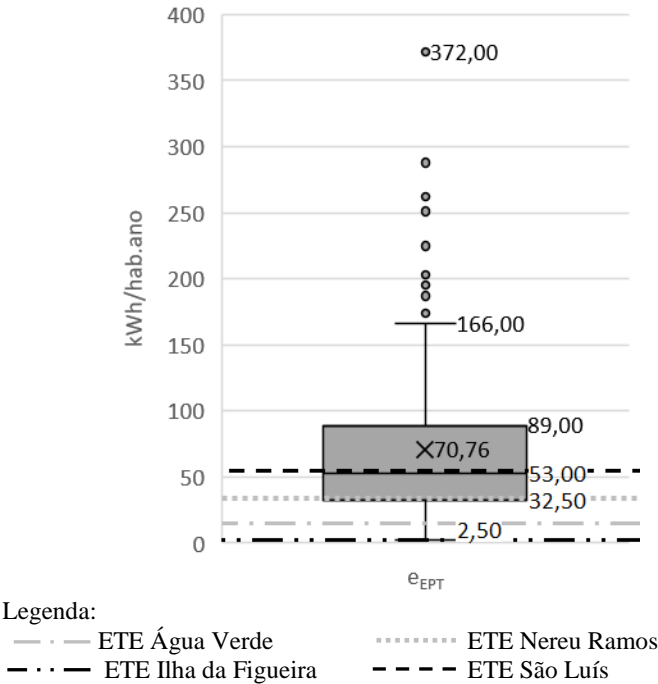


Legenda:

- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| — · — ETE Água Verde | ETE Nereu Ramos |
| — · · — ETE Ilha da Figueira | - - - - ETE São Luís |

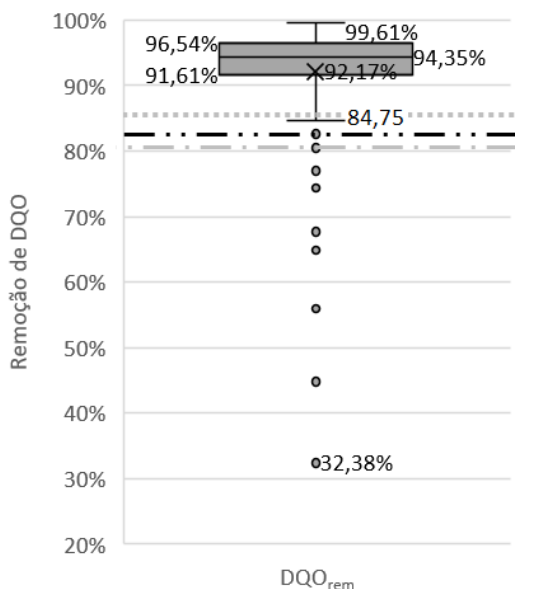
Com relação ao indicador e_{EPT} , as ETEs Figueira e Água Verde apresentaram resultados semelhantes aos de e_v , tendo ótimos desempenhos. Já entre as ETEs Nereu Ramos e São Luís, o resultado se inverteu, esta teve valores entre a mediana e o 3º quartil, muito próximo à mediana, e aquela teve o valor do 1º quartil. Assim como no indicador anterior, o pior valor encontrado nas ETEs da SAMAE JS teve desempenho melhor que a média das estações, sendo essa 70,76 kWh/hab.ano. Para esse indicador foram encontrados 10 outliers, todos acima do máximo (166,0 kWh/hab.ano) O boxplot é apresentado no Gráfico 24.

Gráfico 24 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS



Com relação às eficiências em remoção de DQO e DBO₅, o quartil para se ter como meta é o 3º, como já mencionado. Para remoção de DQO (Gráfico 25), é possível ver através do boxplot que as ETEs Água Verde e Ilha da Figueira foram considerados dois valores aberrantes, ficando abaixo do mínimo de 84,75%. A ETE Nereu Ramos, por sua vez, teve eficiência de remoção um pouco acima do mínimo. Para essa amostra foram encontrados 16 valores considerados outliers, sendo dois deles as estações Água Verde e Ilha da Figueira, como dito acima.

Gráfico 25 - Boxplot com valores estatísticos de remoção de DQO e as eficiências encontrados para as ETEs da SAMAE JS



Legenda:

— · — ETE Água Verde ······ ETE Nereu Ramos
 - - - ETE Ilha da Figueira

A respeito da eficiência de remoção de DBO₅, as considerações são parecidas. As estações Água Verde e Ilha da Figueira apresentaram eficiência de remoção abaixo do valor mínimo, configurando entre os outliers. A ETE Nereu Ramos novamente foi a mais eficiente das estações da SAMAE JS, sendo que sua eficiência é exatamente o valor do 1º quartil. Ao todo foram considerados 10 valores aberrantes, sendo, novamente, a estação Água Verde e Ilha da Figueira duas delas.

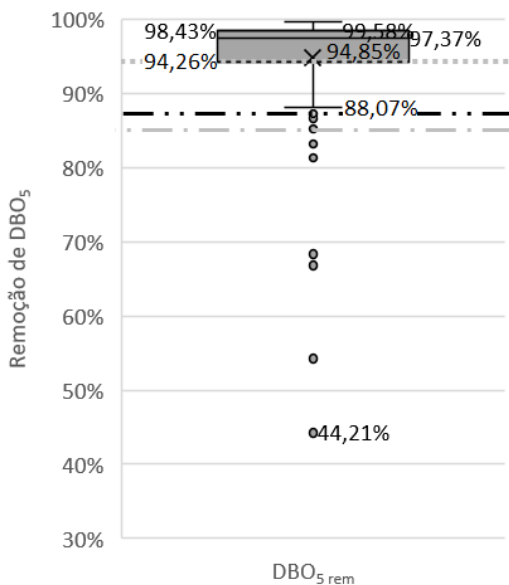
Com isso, fica claro que apesar de as ETEs da SAMAE JS terem, de forma geral, indicadores de desempenho energético relativamente baixos, a remoção da matéria orgânica está aquém da grande maioria das outras estações. Outro fator determinante também é a legislação local para lançamento de efluentes, sendo que em grande parte dos países abordados, se não todos, os padrões de lançamentos são consideravelmente mais restritivos.

Como exemplo, a União Europeia (UE), maior parte dos casos analisados, estabeleceu padrões de lançamento muito mais restritivos do que

os padrões brasileiros. Enquanto a Resolução CONAMA nº430/2011 estabelece um limite para DBO_5 de 120 mg/L ou 60% de remoção e não contempla DQO, a União Européia (UE) através do Council Directive 91/271/EEC estabeleceu um limite para DBO_5 de 25 mg/L ou remoção entre 70% e 90% e para DQO um limite de 125 mg/L ou remoção de 75%. Em áreas consideradas sensíveis pela UE também são impostos limites de 1 a 2 mg/L ou 80% na remoção de fósforo e uma remoção de nitrogênio de 70 a 80% ou um limite de 10 a 15 mg/L, dependendo da região e do tamanho da população.

Percebe-se assim uma provável justificativa para um baixo consumo energético em estações brasileiras. Deve-se levar em conta também que a ETE Figueira teve um ótimo desempenho nos indicadores devido ao tipo de tratamento adotado, sem processo de aeração, enquanto na base de dados, dos tratamentos que foram especificados, todos possuem etapas aeradas.

Gráfico 26 - Boxplot com valores estatísticos de remoção de DBO_5 e as eficiências encontrados para as ETEs da SAMAE JS



Legenda:

— · — ETE Água Verde

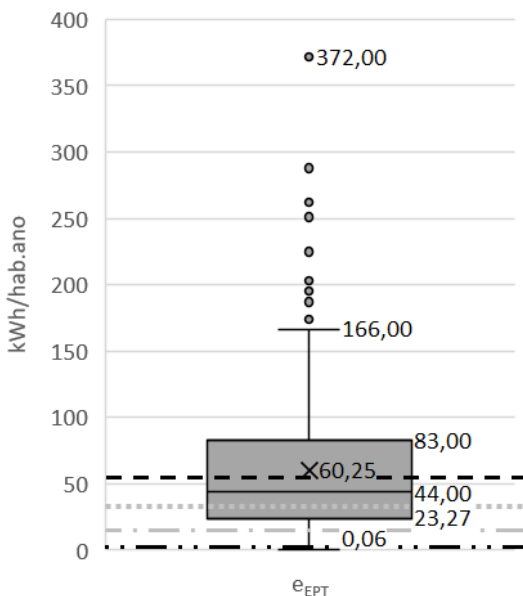
..... ETE Nereu Ramos

- · - ETE Ilha da Figueira

5.3.3. Benchmarking Global

Também foram comparadas as ETEs nacionais e internacionais juntas. Somaram-se dessa forma 223 estações, contando com as quatro ETEs da SAMAE JS, para comparação. Como pode ser observado no Gráfico 29, a maior parte das ETEs nacionais apresentam valores para o indicadores e_{EPT} inferiores às ETEs internacionais. Isso se deve principalmente ao fato de apenas 15 das 42 ETEs brasileiras terem algum processo aerado durante o tratamento, com isso, o consumo energético das outras 27 ETEs tendem a ser significativamente menores. Outro fator importante são os padrões de lançamentos mais restritivos nos países pesquisados, como citado anteriormente. O Gráfico 27, a seguir, apresenta os valores estatísticos através do boxplot, representado os valores das ETEs da SAMAE JS através de linhas.

Gráfico 27 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS (ETEs Nacionais e Internacionais)



Legenda:

- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| — · — ETE Água Verde | ETE Nereu Ramos |
| - · · - ETE Ilha da Figueira | - - - - ETE São Luís |

Com exceção do valor máximo, percebe-se uma redução nos valores estatísticos obtidos, contudo, de forma geral o resultado foi similar. As ETEs Figueira e Água Verde têm valores característicos entre o mínimo e o 1º quartil, a ETE Nereu Ramos entre 1º quartil e mediana e a São Luís entre mediana e 3º quartil. Foram encontrados 16 outliers acima do valor máximo de 166 kWh/hab.ano.

Se analisados os valores estatísticos de forma separada, entre nacionais e internacionais, percebe-se uma grande diferença nos indicadores (Gráfico 28). Nota-se que o valor máximo das ETEs Nacionais (36,20 kWh/hab.ano) está muito próximo do valor do 1º quartil para as ETEs Internacionais (32,50 kWh/hab.ano), evidenciando essa discrepância entre os indicadores.

Gráfico 28 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} para ETEs Nacionais e Internacionais separadamente

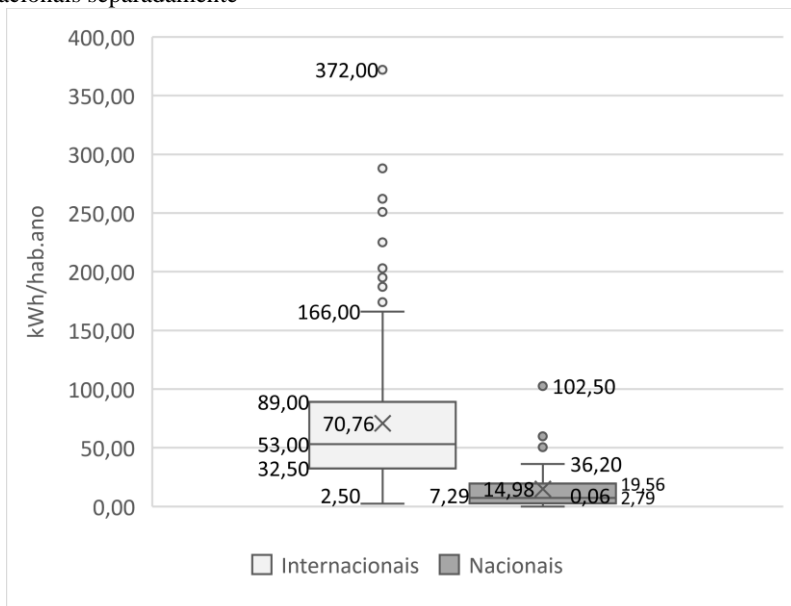
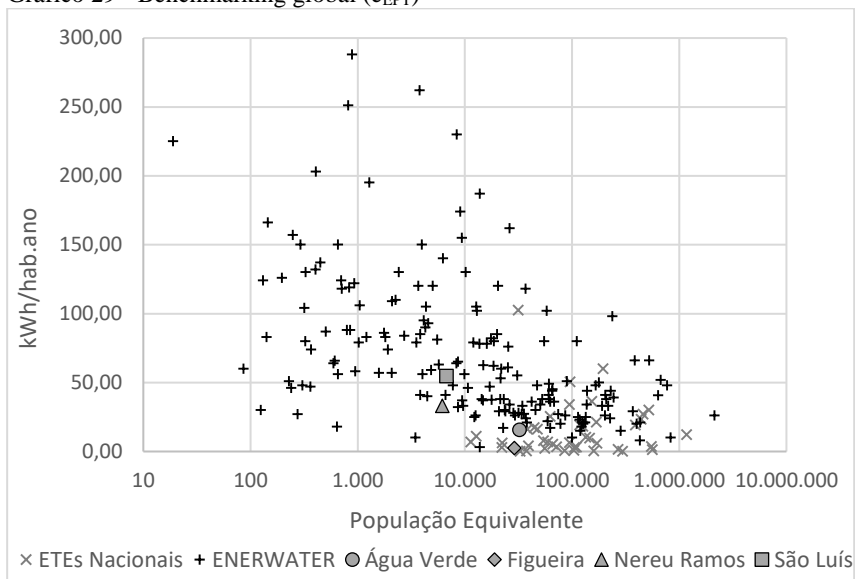
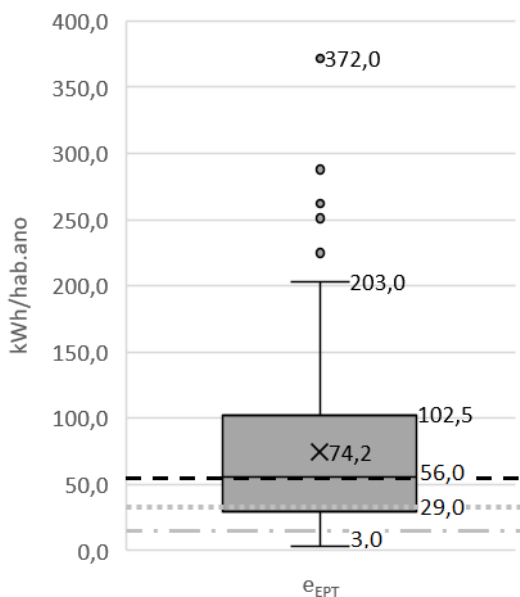


Gráfico 29 - Benchmarking global (c_{EPT})

Se analisadas apenas as estações que possuem algum tipo de processo de lodos ativados, as ETEs nacionais apresentam valores mais parecidos com as internacionais (Gráfico 31). De forma semelhante, apesar dos valores estatísticos serem um pouco maiores que os anteriores, as ETEs da SAMAE JS (com exceção da ETE Ilha da Figueira, não analisada) ficaram situados praticamente nas mesmas faixas de valores, como pode ser visto no Gráfico 30. Apenas a ETE São Luís mudou de faixa, ficando com valor característico levemente abaixo da mediana. Contabilizaram-se 151 ETEs, contando as três da SAMAE JS, dessas apenas 6 foram consideradas outliers.

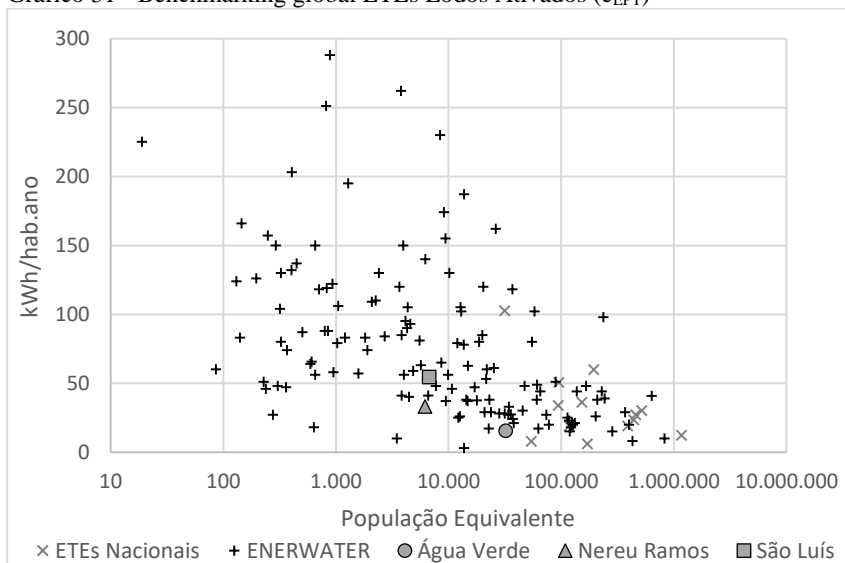
Gráfico 30 - Boxplot com valores estatísticos de e_{ETP} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS, apenas para ETEs com algum processo de Lodos Ativados (ETEs Nacionais e Internacionais)



Legenda:

— · — ETE Água Verde
 ETE Nereu Ramos

- - - - ETE São Luís

Gráfico 31 - Benchmarking global ETES Lodos Ativados (e_{EPT})

De forma geral, observa-se que os consumos energéticos das ETES analisadas no Brasil são menores em virtude das tecnologias adotadas e da legislação vigente. Desaconselha-se, portanto, o benchmarking entre estações de tratamento onde os padrões de lançamento tenham diferenças consideráveis e condições climáticas muito diferentes. No presente trabalho, utilizou-se da base de dados internacional em virtude da escassez de informações com relação a ETES brasileiras.

5.4. INDICADORES ENCONTRADOS NA LITERATURA

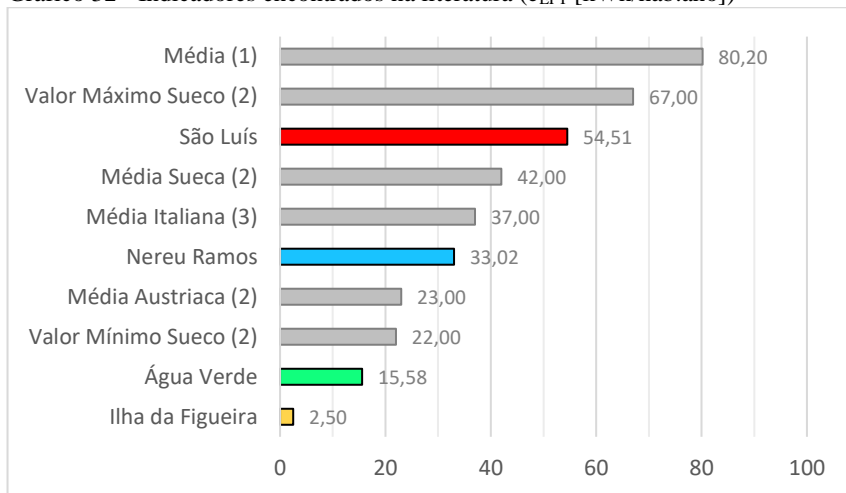
Além do benchmarking feito com as bases de dados obtidas, foram encontrados diversos valores característicos na literatura, os quais serão utilizados para comparação com as ETES da SAMAE de Jaraguá do Sul. Os indicadores de desempenhos serão avaliados separadamente em cada subcapítulo a seguir.

5.4.1. Consumo específico por habitante equivalente (e_{EPT})

Salvo a ETE Figueira, que em virtude da tecnologia adotada consome pouquíssima energia, e a ETE São Luís que está em início de operação e até então superdimensionada, as outras ETES da SAMAE JS tiveram bons

resultados. Atribui-se esse fato aos padrões de lançamento de efluentes mais restritivos nos países pesquisados e, possivelmente, ao clima mais favorável para tratamento de esgotos no Brasil. Os valores característicos encontrados estão apresentados no Gráfico 32.

Gráfico 32 - Indicadores encontrados na literatura (e_{EPT} [kWh/hab.ano])



Legenda:

- (1) – (ENERWATER, 2015) (3) – (STAMATELATOU; TSAGARAKIS, 2015)
 (2) – (JONASSON, 2007)

Além dos valores mostrados no gráfico acima, Fricke (2009) obteve valores característicos por faixa de habitantes equivalentes atendidos. Para faixa entre 5 e 10 mil habitantes, caso das ETEs Nereu Ramos e São Luís, o valor característico é de 44 kWh/hab.ano. Na faixa entre 10 e 100 mil, caso das ETEs Água Verde e Figueira, o indicador reduz para 35 kWh/hab.ano.

Ademais, Stamatelatos e Tsagarakis (2015) estimam para pequenas estações valores entre 30 e 50 kWh/hab.ano. Já em Wisconsin, 14 ETEs de Lodos Ativados com vazão entre 3.785 e 18.925 m³/d, caso da ETE Água Verde, obtiveram valor médio de 88,47 kWh/hab.ano (FOCUS ON ENERGY, 2016).

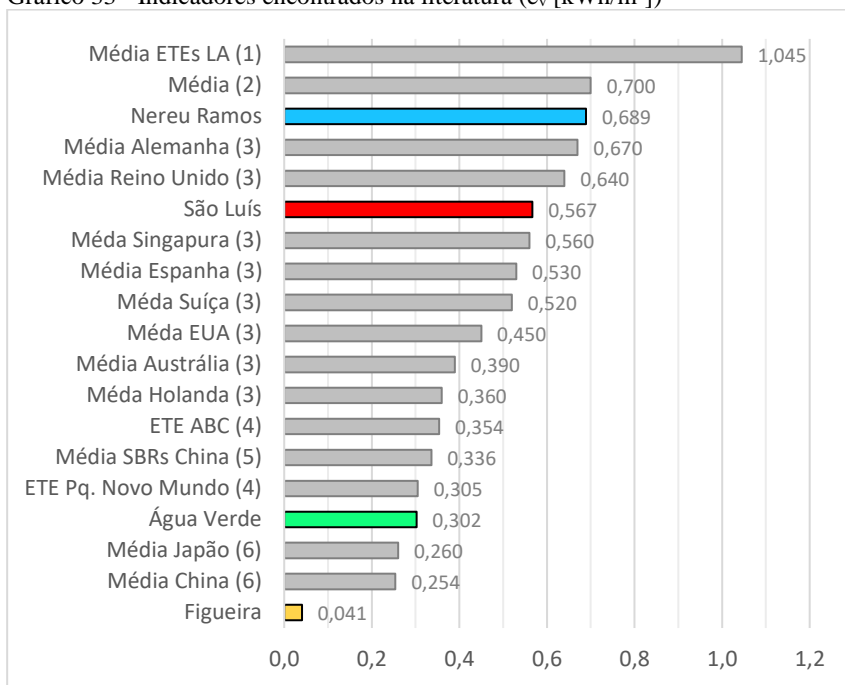
Por fim, um estudo alemão obteve indicadores de desempenho com relação a faixa de habitantes atendidos e pelo tipo de tratamento adotado (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 2012). Para estações que operam com Lodos Ativados em Batelada numa faixa de população atendida entre 5.001 e 10.000 habitantes, caso das ETEs

Nereu Ramos e São Luís, o valor característico encontrado foi de 50,20 kWh/hab.ano. Já para faixa de 10.001 a 100.00 habitantes equivalentes, o valor característico foi de 35,20 kWh/hab.ano.

5.4.2. Consumo específico por volume tratado (e_v)

Os valores para o indicador de desempenho e_v são os mais comuns de se encontrar na literatura, como pode se ver no Gráfico 33. Destacam-se entre os indicadores obtidos as ETEs ABC e Parque Novo Mundo, ambas da SABESP e atendem a região metropolitana de São Paulo.

Gráfico 33 - Indicadores encontrados na literatura (e_v [kWh/m³])



Legenda:

- | | |
|---|-----------------------------|
| (1) – (FOCUS ON ENERGY, 2016) | (4) – (SABESP, 2009) |
| (2) – (ENERWATER, 2015) | (5) – (YANG et al., 2010) |
| (3) – (HERNÁNDEZ-SANCHO; MOLINOS-SENANTE; SALA-GARRIDO, 2011) | (6) – (TAO; CHENGWEN, 2012) |

A ETE Figueira novamente teve valor menor que todos os indicadores obtidos, enquanto a ETE Água Verde ficou com o indicador maior

apenas que as médias encontradas para o Japão e China. A ETE Nereu Ramos obteve valor inferior a apenas 2 estudos encontrados, enquanto a São Luís obteve valor menor também que às médias da Alemanha e Reino Unido.

Com relação às ETEs brasileiras, a Água Verde teve indicador discretamente inferior à ETE Parque Novo e um pouco abaixo da ETE ABC. Já as ETEs São Luís e Nereu Ramos tiveram valores característicos bastante acima dessas. O Gráfico 33 apresenta a comparação dos indicadores.

Em pesquisa realizada na Espanha por Hernández-Sancho, Molinhos-Senante e Sala-Garrido (2011), o valor médio para 92 estações com aeradores mecânicos (assim como Água Verde e Nereu Ramos) foi de 0,799 kWh/m³, enquanto que para as 84 estações com difusores (ETE São Luís), o valor médio foi de 0,843 kWh/m³, contrariando o que diz a literatura sobre o sistema mais eficiente energeticamente. A mesma pesquisa aponta um indicador médio de 0,486 kWh/m³ para 34 estações com vazões maiores que 250.000 m³/ano (todas ETEs da SAMAE JS). Ainda, Hernández-Sancho, Molinhos-Senante e Sala-Garrido (2011) apresentam um valor médio para 87 ETEs com remoção de DQO entre 400 e 800 g/m³ de 0,685 kWh/m³.

Em Wisconsin, 14 ETEs de Lodos Ativados com vazão entre 3.785 e 18.925 m³/d, caso da ETE Água Verde, obtiveram valor médio de 0,661 kWh/m³ e indicador tido como melhores práticas para Lodos Ativados de 0,436 kWh/m³ (FOCUS ON ENERGY, 2016).

5.4.3. Consumo específico por kg de DQO removida (e_{DQO})

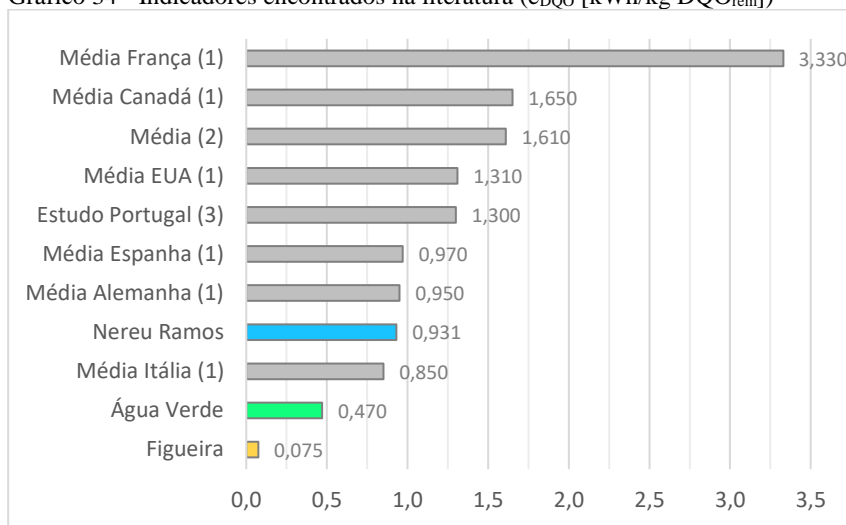
Os indicadores de consumo específico por kg de DQO removida segue a mesma tendência dos anteriores, sendo os valores das ETEs da SAMAE JS inferiores aos pesquisados, com exceção da ETE Nereu Ramos que teve valor maior que a média da Itália e da ETE São Luís que não foi possível obter o indicador. As diferenças nesse caso foram maiores que para os indicadores anteriores, no qual a primeira média depois da ETE Água Verde foi da Itália, sendo quase duas vezes maior que a ETE da SAMAE JS.

Assim como nos indicadores anteriores, as exigências das legislações dos países relacionados, acarreta num maior consumo geral de energia, ocasionando assim valores característicos maiores que das ETEs da SAMAE de Jaraguá do Sul. O Gráfico 34 mostra a comparação com os indicadores de desempenho encontrados.

Além dos valores característicos apresentados no gráfico abaixo, Longo et al. (2016) obteve valores para diferentes faixas de habitantes

atendidos. Estações entre 2 mil e 10 mil habitantes equivalentes, caso da ETE Nereu Ramos, tiveram valor médio (de 87 ETEs) de 1,54 kWh/kg DQO_{rem}. Já para faixa de 10 a 50 mil habitantes equivalentes, caso das estações Água Verde e Ilha da Figueira, o valor característico médio encontrado num universo de 89 ETEs, foi de 1,02 kWh/kg DQO_{rem}.

Gráfico 34 - Indicadores encontrados na literatura (eDQO [kWh/kg DQO_{rem}])



Legenda:

(1) – (LONGO et al., 2016)

(3) – (SILVA; ROSA, 2015)

(2) – (ENERWATER, 2015)

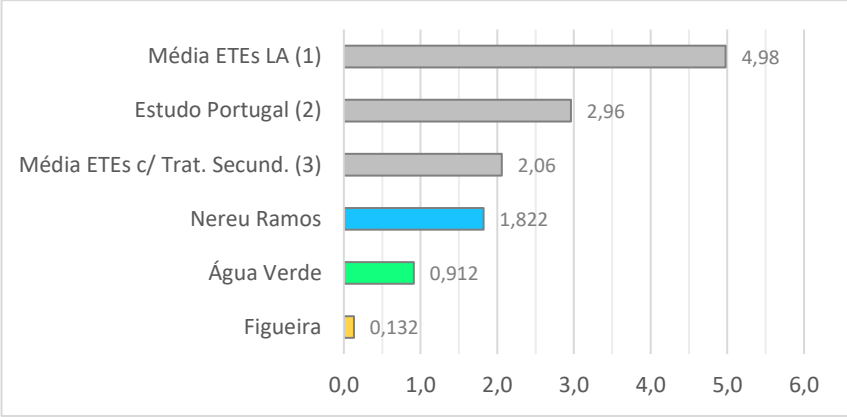
5.4.4. Consumo específico por kg de DBO₅ removida (eDBO₅)

Como relatado em bibliografia, o indicador eDBO₅ é o mais escasso na literatura, tendo poucos estudos e valores característicos para tal. Novamente os indicadores das estações da SAMAE JS apresentaram bons valores característicos e ficaram à frente dos indicadores encontrados.

Em Wisconsin, 14 ETEs de Lodos Ativados com vazão entre 3.785 e 18.925 m³/d, caso da ETE Água Verde, obtiveram valor médio de 3,14 kWh/kg DBO_{5rem} (FOCUS ON ENERGY, 2016). Já em pesquisa realizada com 17 ETEs em Portugal, obteve-se uma faixa de valores entre 0,30 e 8,25 kWh/kg DBO_{5rem} (SILVA; ROSA, 2015). No mesmo estudo, utilizou-se das seguintes faixas de valores característicos para avaliação do consumo específico:

- $e_{DBO5} \leq 2,00 \text{ kWh/kg DBO}_{5rem}$ – Bom
- $2,00 < e_{DBO5} < 10,00 \text{ kWh/kg DBO}_{5rem}$ – Regular
- $e_{DBO5} \geq 10,00 \text{ kWh/kg DBO}_{5rem}$ – Ruim

Gráfico 35 - Indicadores encontrados na literatura (e_{DBO5} [kWh/kg DBO_{5rem}])



Legenda:

(1) – (FOCUS ON ENERGY, 2016)

(3) – (YANG et al., 2010)

(2) – (SILVA; ROSA, 2015)

5.4.5. Consumo específico da aeração ($e_{aer, PE}$; $e_{aer, v}$; $e_{aer, DQO}$)

Os indicadores de consumo específico para a aeração raramente são abordados na literatura. Contudo, foram encontrados alguns valores pertinentes para $e_{aer, PE}$, $e_{aer, v}$ e $e_{aer, DQO}$. A ETE Ilha da Figueira não possui aeração, portanto não fará parte das comparações. Também ficará de fora a ETE São Luís, por não obter dados suficientes para poder estimar o consumo de energia dos sopradores. Abaixo, a Tabela 16 apresenta os indicadores de desempenho para as ETES Água Verde e Nereu Ramos.

Tabela 16 - Indicadores de consumo específicos para a aeração das ETES da SAMAE JS

ETE	$e_{aer, PE}$ (kWh/hab.ano)	$e_{aer, v}$ (kWh/m ³)	$e_{aer, DQO}$ (kWh/kg DQO _{rem})
Água Verde	12,99	0,252	0,392
Nereu Ramos	27,36	0,571	0,771

Jordão (2008) apresenta um valor de 15,0 kWh/hab.ano para $e_{aer, PE}$ em sistemas que operam com UASB seguido de LAC e com idade de lodo

na faixa de 7 dias. A ETE Nereu Ramos, composta por RALF seguido de SBR, obteve indicador bastante acima desse. Já Foladori, Vaccari e Vitali (2015), em pesquisa com 5 estações entre 582 e 9.727 habitantes, encontraram estações entre 4,69 e 28,30 kWh/hab.ano, com valor médio de 16,20 kWh/hab.ano. Com pouco mais de 6 mil habitantes atendidos, a ETE Nereu Ramos apresenta valor característico próximo ao máximo encontrado.

Foladori, Vaccari e Vitali (2015) também levantaram valores específicos para a aeração com relação à DQO removida. Na mesma pesquisa citada acima, os valores mínimo e máximo encontrados foram 0,204 e 1,237 kWh/kg DQOrem, respectivamente. O valor médio foi de 0,753 kWh/kg DQOrem, um pouco menor que a ETE Nereu Ramos.

Finalmente, foram encontrados três valores característicos para $e_{aer, v}$. Stamatelatos e Tsarakis (2015) apresentam um valor médio de 0,634 kWh/m³, enquanto Longo et al. (2016) apresenta valores por faixa de população equivalente atendida. Entre 2 e 10 mil habitantes o valor característico médio foi de 0,210 kWh/m³, bastante abaixo do medido na ETE Nereu Ramos. Para faixa de população de 10 a 50 mil habitantes, o valor médio foi de 0,180 kWh/m³, ficando abaixo do medido na ETE Água Verde.

Observa-se, de modo geral, que os valores característicos médios encontrados foram maiores que os valores medidos nas ETEs da SAMAE JS. Contudo, destaca-se o fato de os valores obtidos para as ETEs Água Verde e Nereu Ramos serem estimados em função da potência e tempo de funcionamento dos equipamentos. Sendo assim, necessita-se de uma medição mais fiel para poder comparar os valores com segurança.

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho buscou avaliar, através do processo de benchmarking, a eficiência energética de quatro Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários no município de Jaraguá do Sul. Através dos dados fornecidos pela companhia, SAMAE de Jaraguá do Sul, e das comparações realizadas, chegou-se as seguintes conclusões:

Com relação ao objetivo específico número 1, baseando-se nos resultados das análises semanais fornecidas pela SAMAE de Jaraguá do Sul e pelos valores encontrados na literatura, pode-se concluir que:

- Com exceção da ETE São Luís, que não foi possível avaliar, as outras estações tiveram, na média, eficiências de remoção de DBO_5 dentro do permitido pela Lei Estadual de Santa Catarina nº 14.675 de 2009. As médias foram avaliadas entre o período de março de 2016 até abril de 2017 e ficaram todas acima dos 80%. As eficiências de remoção de DBO_5 foram de 85,2%, 87,3% e 94,3% para as ETES Água Verde, Ilha da Figueira e Nereu Ramos, respectivamente. Na mesma ordem, as eficiências de remoção de DQO foram de 80,5%, 82,7% e 85,4%.

- Em comparação às eficiências encontradas na base de dados (apenas de estações internacionais), 175 referências para remoção de DQO e 135 para remoção de DBO_5 , a parcela de matéria orgânica removida nas ETES da SAMAE JS é consideravelmente menor. Com relação à base de dados, a ETE Nereu Ramos está entre as 25% piores em eficiência de remoção de DQO e apresenta o valor do 1º quartil para remoção de DQO₅. Já as ETES Água Verde e Ilha da Figueira foram considerados outliers com relação ao banco de dados, apresentando eficiências muito abaixo das outras estações.

Quanto ao objetivo específico número 2, baseando-se nos resultados das análises semanais e nas contas mensais de energia elétrica fornecidas pela SAMAE de Jaraguá do Sul, e com base também nas informações obtidas através de visita às estações e consultas aos Memoriais Descritivos das mesmas, pode-se concluir que:

- Entre as estações da SAMAE JS, a ETE Ilha da Figueira é a estação que menos consome energia elétrica, como já era esperado em virtude do tipo de tratamento, com uma média de 6.018,33 kWh por mês. A que mais consumiu, em média, foi a ETE Água Verde, com 41.839,42 kWh por mês, entretanto, a ETE São Luís (consumo mensal de 30.552,67 kWh, em média) está em início de operação e passou a ser a maior consumidora de energia elétrica nos últimos dois meses. A ETE Nereu Ramos teve média de consumo de 17.007,92 kWh por mês.

- Os consumos estimados de energia elétrica dos equipamentos de aeração nas ETEs Água Verde e Nereu Ramos foram, na média, de 84% em relação ao consumo total da estação. Tais valores foram estimados com base nos dados de potência do equipamento e tempo de funcionamento, não representando fielmente a realidade.

- A ETE Ilha da Figueira foi, certamente, a que apresentou melhor eficiência energética em todos os indicadores, em virtude do processo de tratamento adotado sem aeração. Entre as três que possuem lodos ativados, a ETE Água Verde foi a mais eficiente e com certa distância das outras. A ETE Nereu Ramos teve os valores característicos praticamente duas vezes maior em todos os indicadores em relação à Água Verde, enquanto que na ETE São Luís só puderam ser medidos dois indicadores, e_v e e_{EPT} (i.e. kWh/m³ e kWh/hab.ano). Percebe-se que essa estação ainda está superdimensionada com equipamentos muito maiores que a demanda atual, além do período avaliado ser uma fase de adaptação da parte operacional da estação e biológica do efluente.

Já em relação ao objetivo específico número 3, baseando-se nos valores característicos medidos nas ETEs da SAMAE JS, comparando-os aos indicadores de desempenho encontrados em literatura nacional e internacional e levando em consideração às eficiências de remoção das estações, conclui-se que:

- Com relação às ETEs Nacionais encontradas, as estações Ilha da Figueira e Água Verde apresentaram boas eficiências para o indicador e_{EPT} (único disponível). A ETE Figueira obteve o 10º melhor valor característico, ficando entre as estações mais eficientes e que não possuem processos aerados. A ETE Água Verde teve a segunda maior eficiência entre as estações com algum tipo de processo de Lodos Ativados, ficando atrás somente de uma estação que atende aproximadamente 1,2 milhões de habitantes, portanto, com uma possível economia de escala. Já as ETEs Nereu Ramos e São Luís apresentaram baixa eficiência energética, configurando entre as 6 estações menos eficientes das 46 disponíveis.

- A respeito dos indicadores de consumo energético para a aeração, encontrados apenas em ETEs Nacionais, nota-se que a ETE Nereu Ramos apresenta novamente baixo desempenho energético se comparado às outras, sendo a 8ª entre as 9 estações disponíveis. A ETE Água Verde apresentou boa eficiência com relação às outras, sendo a 5ª mais eficiente para esse indicador, na qual a ETE mais eficiente utiliza aeração somente no pré-tratamento e a 2ª é composta por UASB seguido de flotação por ar dissolvido. Destaca-se novamente que os valores característicos, relativos

a aeração, obtidos para as ETEs da SAMAE JS foram estimados com base nas informações disponíveis.

- Em comparação às estações internacionais, observa-se que as ETEs da SAMAE JS tiveram, de forma geral, uma boa eficiência energética. No entanto, atribui-se esse desempenho à discrepância entre os padrões de lançamentos nacionais e internacionais (especificamente dos países envolvidos) e possivelmente às diferenças no clima. A ETE Ilha da Figueira teve o melhor desempenho nos indicadores e_v e e_{EPT} , e ficou próxima aos menores indicadores de e_{DQO} e e_{DBO5} , entretanto, é a única na lista que não possui processo aeróbio. A ETE Água Verde teve os quatro indicadores entre o mínimo e o 1º quartil encontrado no banco de dados, mostrando um bom desempenho apesar da diferença na remoção dos poluentes. A ETE Nereu Ramos, por sua vez, apresentou uma eficiência energética inferior, tendo valores para os indicadores e_{DQO} e e_{DBO5} entre o 1º quartil e mediana, o indicador e_{EPT} teve o valor do 1º quartil, enquanto que para e_v o valor característico ficou entre a mediana e 3º quartil. Por fim, na ETE São Luís foi possível medir apenas os indicadores e_v e e_{EPT} , sendo que esse apresentou valores entre mediana e 3º quartil e aquele entre o 1º quartil e mediana.

- Os indicadores de desempenho encontrados em literatura, corroboram com o benchmarking feito com as estações internacionais. A ETE Água Verde, por exemplo, obteve desempenho para e_{EPT} melhor que a média de países como Áustria e Suécia, sendo que esse possui programas de economia energética em ETEs e aquele se utiliza do processo de benchmarking há alguns anos. Para o indicador e_v a situação é parecida, apenas a ETE Nereu Ramos teve eficiência energética pior que as médias de países como Alemanha e Reino Unido. Nesse caso, a ETE Água Verde apresentou desempenho bastante melhor que a média de países como EUA, Suíça, Singapura e Espanha, além de Alemanha e Reino Unido, mas em comparação com as ETEs da SABESP, Parque Novo Mundo e ABC, apresentaram valores muito próximos. Para os outros indicadores, e_{DQO} e e_{DBO5} , os resultados foram semelhantes ao benchmarking.

Finalmente, conclui-se que as estações de tratamento de esgotos da SAMAE de Jaraguá do Sul, com exceção da ETE Ilha da Figueira, têm potenciais de economia energética e consequentemente financeira. Para tanto, deve-se prosseguir para uma análise mais detalhada do consumo de energia nas estações, conforme recomenda a norma alemã DWA-A 216.

7. RECOMENDAÇÕES

Haja vista a pesquisa realizada, sugerem-se as seguintes recomendações:

- Em virtude da falta de informações nacionais, indica-se acompanhar o histórico dos indicadores de desempenho de cada estação por mais tempo, realizando o mesmo procedimento para outros anos, a fim de se obter uma referência para cada ETE de forma individual.
- Caso seja possível, as análises realizadas para determinação dos valores característicos devem ser feitas através de amostragem composta.
- Recomenda-se monitorar o consumo de energia elétrica isoladamente, ao menos para o processo de aeração.
- Evitar comparações com estações que possuam legislações consideravelmente mais restritivas e/ou climas totalmente diferentes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA); SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL (SNSA). **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília (DF), 2017.

AMPLA Consultoria e Planejamento. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Jaraguá do Sul**. 2010.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12.209**: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro (RJ), 2011. 53 p.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. **Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010**. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. **Decreto nº 8.211, de 21 de março de 2014**. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. **Decreto nº 8.629, de 30 de dezembro de 2015**. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Demográfico**, 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 9 de novembro de 2017.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. **Lei nº 8.080, de 19 de setembro de 1990.** Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em: 7 de outubro de 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Panorama dos Planos Municipais de Saneamento Básico no Brasil.** Brasília, DF. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB):** Mais Saúde com Qualidade de Vida e Cidadania. Brasília (DF). 2013.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2010.** Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2012. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2011.** Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2013. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2012.** Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2014. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2013.** Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SO-

BRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2014**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2015**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2017. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2016**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2018. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 10 de abril de 2018.

CRAWFORD, G; SANDINO, J. **Energy Efficiency in Wastewater Treatment in North America: A Compendium of Best Practices and Case Studies of Novel Approaches**. Alexandria: WERF, 2010.

DESCOINS, N. et al. Energy efficiency in waste water treatments plants: Optimization of activated sludge process coupled with anaerobic digestion. **Energy**, v. 41, n. 1, p. 153–164, maio 2012.

DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL. **DWA-A 216**: Verificação e análise energética – Metodologias para a otimização energética de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Hennef, Alemanha, 2013.

ENERWATER. **Deliverable 2.1 Study of published energy data**: Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of waste water treatment plants. p. 1–32, 2015. Disponível em: <<http://www.enerwater.eu/download-documentation/>>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

ENERWATER. **Deliverable 2.5**: Benchmark database. Fevereiro 2015. Disponível em: <<http://www.enerwater.eu/download-documentation/>>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, RJ, ano X, n. 112, p. 4, janeiro 2017.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries**. Palo Alto, CA, 2013. Disponível em: <<http://www.waterrf.org/PublicReportLibrary/4454.pdf>>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

FOCUS ON ENERGY. **Energy Best Practice Guide: Water & Wastewater Industry**. Madison, WI, USA. Focus on Energy Program, Division of Energy, Department of Administration, 2016.

FRICKE, K. **Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen**. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau., p. 10, outubro de 2009.

Consórcio AKUT / Rotária do Brasil. **Guia para aplicação da verificação energética conforme a norma DWA A 216**. Março de 2014.

HENRIQUES, J.; CATARINO, J. Sustainable value – An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 323–330, jan. 2017.

HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; MOLINOS-SENANTE, M.; SALA-GARRIDO, R. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach. **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 2693–2699, 2011.

IBERDROLA. **Manual de Boas Práticas Energéticas**. p. 93. 2012. Disponível em: <https://www.iberdrola.pt/02sicb/gc/prod/pt_PT/aboutus/docs/MANUAL_BOAS_PRACTICAS.pdf>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

JONASSON, M. **Energy benchmark for wastewater treatment processes** - A comparison between Sweden and Austria. 2007. 68 f.. Master's thesis (Master degree in Civil Engineering) - Faculty of Engineering, Lund University. 2007.

JORDÃO, E. P. Eficiência energética em tratamento de esgotos. **Revista DAE**, São Paulo, SP, v. 177, p. 15–19, 2008.

JORDÃO, E. P. É possível economizar energia nas estações de tratamento de esgoto? **Revista DAE**, v. 63, n. 200, p. 6–12, 2015.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4a Edição. Rio de Janeiro: ABES, 932p. 1995.

LONGO, S. et al. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. **Applied Energy**, v. 179, p. 1251–1268, out. 2016.

MATOS, R. et al. Performance Indicators For Wastewater Services - On the way to a Manual of Best Practice and Its Implementation. **Global Solutions for Urban Drainage**. 2002. p. 1-12.

SILVEIRA, B. et al. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. 2ª ed. Brasília, DF: Ministério das cidades, 2017. 183 p. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/saneamentocidades/probiogas/publicacoes/publicacoes-do-probiogas>>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

NEW YORK STATE ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT AUTHORITY (NYSERDA). **Statewide Assessment of Energy Use by the Municipal Water and Wastewater Sector**. Albany, NY. 2008.

OLIVEIRA, E.C. Comparação das Diferentes Técnicas para a Exclusão de “Outliers”. In: Congresso da Qualidade em Metrologia, 2008, São Paulo, SP. **Anais**. São Paulo: REMESP, 2008.

PANEPINTO, D. et al. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. **Applied Energy**, v. 161, p. 404–411, jan. 2016.

PASQUALINO, J. C. et al. LCA as a Decision Support Tool for the Environmental Improvement of the Operation of a Municipal Wastewater Treatment Plant. **Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 9, p. 3300–3307, 2009.

POST. Energy and Sewage. **Postenote**, v. 7, n. 282, p. 1–4, 2007.

SABESP. Projeto de Eficiência Energética nas ETEs ABC e Parque Novo Mundo. In: Congresso Ambiental Expo, 1º, 2009, São Paulo. **Apresentação**.

SAMPAIO, A. O.; GONÇALVES, M. C. Custos operacionais de estações de tratamento de esgoto por lodos ativados: Estudo de caso ETE Barueri. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20º, 1999, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 676–685.

SILVA, C.; ROSA, M. J. Energy performance indicators of wastewater treatment: A field study with 17 Portuguese plants. **Water Science and Technology**, v. 72, n. 4, p. 510–519, 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª Ed. Volume 1. Belor Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

STAMATELATOU, K.; TSAGARAKIS, K. P. **Introduction to energy management in wastewater treatment plants**. 1ª Ed. London: IWA Publishing, 2015. 355 p.

TAO, X.; CHENGWEN, W. Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China. In: World Congress on Water, Climate and Energy, 2012, Dublin. **Proceedings**. Dublin: IWA, 2012. 1–6 p.

TRIBUNAL DE CONTAS DE SANTA CATARINA (TCE/SC). **Relatório de Auditoria Operacional**: Sistema de Tratamento de Esgoto Insular de Florianópolis. Florianópolis, 2004. Relatório.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities**: A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs. EPA, Washington, DC, 2013.

WENDLAND, A.; OZOGUZ, Y. **Lesson C2**: Operation Costs of Wastewater Treatment Plants. Ahrensburg: EMWATER, 2013. 24 p.

WENNERHOLM, E. **Performance Indicator Analysis as a Basis for Process Optimization and Energy Efficiency in Municipal Wastewater Treatment Plants**. 2014. 66 f. Master's thesis (Master degree

in Environmental and Aquatic Engineering) - Department of Information Technology, Uppsala University Uppsala.

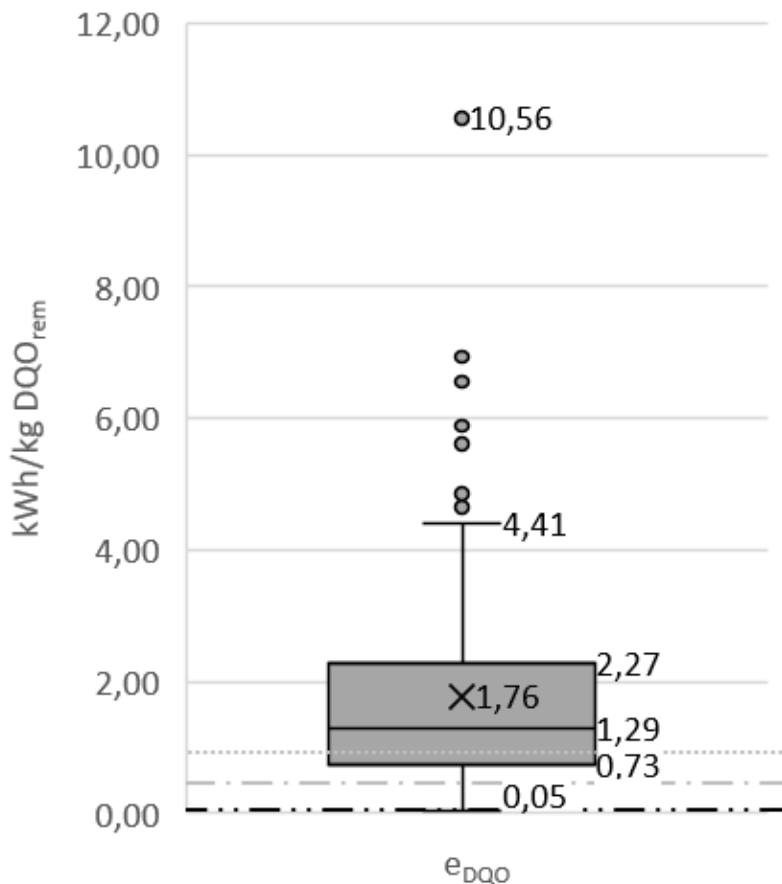
WETT, B.; BUCHAUER, K.; FIMML, C. Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems. In: IWA Leading Edge Technology Conference, 2007, Singapore. **Proceedings**. Asian Water, 2007. p. 21–24.

WORLD HEALTH ORGANIZATION et al (WHO). UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS) 2014 Report. **Investing in Water and Sanitation**: Increasing access reducing inequalities. Geneva: WHO, 2014

YANG, L. et al. Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants. **Water Science and Technology**, v. 62, n. 6, p. 1361–1370, 2010.

ANEXO A – Boxplot dos indicadores de desempenho e_{DQO} e e_{DBO5} para a base de dados do ENERWATER (2016)

Gráfico 36 - Boxplot com valores estatísticos de e_{DQO} e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS



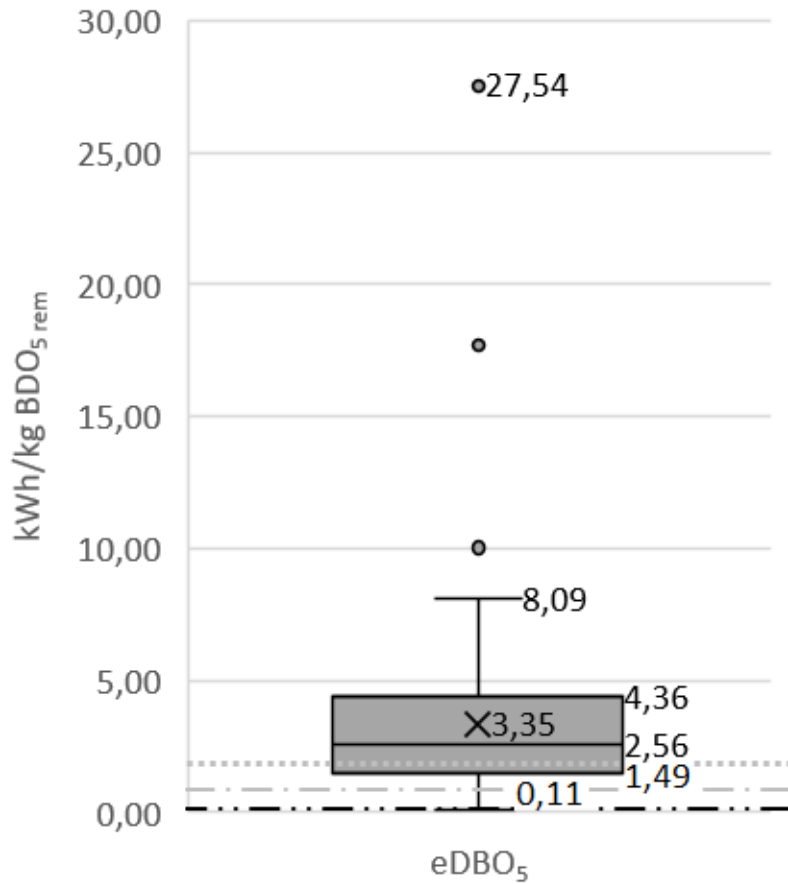
Legenda:

— · — ETE Água Verde

..... ETE Nereu Ramos

- · - ETE Ilha da Figueira

Gráfico 37 - Boxplot com valores estatísticos de eDQO e valores característicos encontrados para as ETEs da SAMAE JS



Legenda:

— · —	ETE Água Verde	ETE Nereu Ramos
- · -	ETE Ilha da Figueira		